



Université
de Toulouse

THESE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Génie Électrique*

Présentée et soutenue par *Elyse SILI*

Master Recherche Nanostructures et Matériaux Fonctionels

Le 11 décembre 2012

Titre : *Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique*

JURY

M. Jean-Hugues PAILLOL - Professeur des Universités - PAU. Rapporteur
M. Pascal RAIN - Professeur des Universités - G2ELab Grenoble. Rapporteur
M. Michel DUNAND - Pilote Recherche Amont / Expert SAFRAN. Examineur
M. Thierry LEBEY - Directeur de recherche CNRS - Toulouse. Examineur
M. Petru NOTINGHER - Professeur des Universités - Montpellier. Examineur
M. Jean-Pascal CAMBRONNE - Professeur des Universités - Toulouse. Directeur de thèse

Ecole doctorale : *Génie Electrique, Electronique, Télécommunications, du système au nanosystème*

Unité de recherche : *Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (UMR 5213)*

Directeur(s) de Thèse : *M. Jean-Pascal CAMBRONNE*

Rapporteurs : *M. Jean-Hugues PAILLOL - Professeur des Universités, PAU*
M. Pascal RAIN - Professeur des Universités, Grenoble



Remerciements...

Cette thèse a été réalisée au Laboratoire LAPLACE - Toulouse, site UPS. Je remercie très chaleureusement monsieur Christian LAURENT, directeur du laboratoire pour m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Je remercie sincèrement Monsieur Jean Pascal Cambronne, mon directeur de thèse pour m'avoir fait confiance, encouragé et conseillé, tout en me laissant une grande liberté durant ces trois années, ainsi que je remercie Monsieur Michel Dunand pour son suivi pendant ces trois années de thèse.

Je remercie vivement les personnes qui ont fait partie de mon Jury. Leurs suggestions et remarques ont contribué à l'amélioration de la version finale de ce mémoire. Je remercie monsieur Petru Notingher, professeur à l'Université de Montpellier, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse, messieurs Jean Paillol professeur à l'Université de PAU et Pascal Rain professeur à l'Université de Grenoble, qui ont assuré la fonction de rapporteurs en apportant une analyse détaillée du manuscrit et enfin messieurs Thierry Lebey directeur de recherche CNRS et Michel Dunand responsable interconnexion Labinal, qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je remercie l'ensemble du laboratoire LAPLACE, et de l'équipe MDCE, en particulier l'administration et les services informatiques. Je remercie très spécialement Flavien Koliatene, Sorin Dinculescu, Alain Boulanger, Benoit Lantin et Benoit Schlegel pour leur aide inestimable tout au long de mon travail.

Depuis mon arrivée sur Toulouse, j'ai eu la chance de côtoyer plusieurs personnes qui m'ont assuré les meilleures conditions pour ma réussite. Loin de chez moi, j'ai eu la chance d'être entourée d'un amour familial dans plusieurs occasions. Je tiens à remercier Rabih, Mouhamad, Bassem, Bernard, Rachelle, Nadine, Mireille, Lama, Marie Rose, Josette et Rémi, ma première « famille d'accueil » à Toulouse pour l'aide et la confiance qu'ils m'ont accordées.

A tous mes amis de longue date... en particulier Isabelle, Roula, Rouba, Mary, Maria, Mirna, Marise, Rima, Micha, Antoine, Roy, Michel, Joe, Elie et Rabih pour ne cesser de m'encourager, me conseiller et m'aimer.

Je remercie bien évidemment mes collègues de bureau, Van Hai, Michael, Rabih, Duc et Chafé, Thibaut et Laurent.

Pour ton amour inconditionnel, pour ton éternel soutien et pour la place que j'occupe dans ta vie et dans ton coeur... Elias, je te remercie du fond de mon coeur.

Je ne pourrais poursuivre cette page sans dire un grand MERCI à mes grands parents: Marie et Vincent, mes parents: Joseph et Nahia, mes sœurs: Rebecca et Marie pour leur soutien, leur encouragement et leur amour inconditionnel.

*Enfin merci à **DIEU** toujours présent dans ma vie.*

Research is what I'm doing when I don't know what I'm doing.

Wernher von Braun



TITRE : Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique

RESUME : Les inquiétudes, entretenues d'une part par l'augmentation exponentielle de la consommation des énergies fossiles et d'autre part par le souci de préserver l'environnement, ont motivé les acteurs impliqués dans le domaine du transport à mettre en place des solutions alternatives. Une des solutions possibles est le développement des véhicules plus électriques, voire hybrides. Or le passage vers une nouvelle génération d'avion plus électrique exige l'augmentation de la puissance électrique embarquée qui peut être atteinte tout en préservant la masse embarquée à travers l'augmentation du niveau de tension. Cette augmentation de tension combinée aux contraintes imposées par l'environnement avionique : baisse de pression liée à l'altitude, cycles de température et variation du taux d'humidité, entraînent l'apparition de nouveaux phénomènes qui sont défavorables aux Systèmes d'Isolation Electrique (SIE) tels que les décharges partielles (DP). L'apparition de ces décharges dépend des conditions de fonctionnement et peut conduire à un vieillissement prématuré des matériaux isolants et donc du matériel électrique des systèmes embarqués. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail présenté dans ce manuscrit, dont l'objectif est d'évaluer l'impact des contraintes imposées en environnement aéronautique sur les caractéristiques des décharges et sur le vieillissement des isolants sous décharge.

Dans un premier temps, des mesures de caractéristiques de décharges telles que leur seuil d'apparition et l'énergie dissipée en contraintes combinées (P, T, Hr), ont montré la présence de deux mécanismes de claquage qui régissent le développement de la décharge à gauche du minimum de Paschen suivant la valeur de la température appliquée. De plus, une étude menée sur la validité des expressions correctives introduites à la loi de Paschen a démontré leur validité sous pression atmosphérique. Pour des combinaisons de températures et de pressions, une nouvelle formule empirique pour le calcul de la tension de claquage a été proposée et validée pour des températures supérieures à 35°C. Ensuite une étude sur l'impact de l'environnement aéronautique ainsi que d'autres paramètres sur les caractéristiques de la décharge a été abordée. Il a été démontré que ses caractéristiques varient en fonction du paramètre appliquée (T, P, Hr, d, U), et cette variation a été expliquée en se référant au *libre parcours moyen* des électrons. Enfin, une étude sur l'influence de l'environnement aéronautique sur le comportement de l'énergie dissipée par les décharges et sur le vieillissement du polyimide a été menée, afin de trouver une relation entre ces deux grandeurs. D'après les résultats obtenus, il a paru difficile d'établir une relation directe entre ces deux grandeurs, et valable quelles que soient les conditions appliquées à cause, en particulier, de la variation des propriétés de la surface vieillie en fonction des conditions atmosphériques. Une relation plus pertinente entre la durée de vie et une autre caractéristique de la décharge a été proposée en considérant l'intensité des décharges. Il a été démontré que quelles que soient les conditions appliquées, la durée de vie et l'intensité des décharges sont inversement proportionnelles.

Mots-clés : Décharge partielle, énergie dissipée, libre parcours moyen, polyimide, vieillissement électrique, durée de vie.

TITLE : Study and characterization of partial discharges and the aging of polyimide in aeronautical environment

ABSTRACT : The anxiety maintained on one hand by the exceptional increase in the consumption of fossil fuels and on the other hand by the concern for environmental protection has motivated the scientists who work in the transportation domain to find alternative solutions. So the aircraft industry is increasingly shifting towards more electrical technologies. Hence electrical systems with higher powers are required. However, the increase in electrical power demand to supply these alternative electrical systems requires higher voltages. Or increasing the supply voltage combined with the constraints imposed by the avionics environment (pressure drop due to the altitude, temperature cycles and variation of moisture) would introduce others, namely an increased probability of electrical discharge. Unwanted partial discharge (PD) in electrical systems can lead to the deterioration of solid insulation and consequently failure of whole components. The need therefore exists to understand the effect of environmental parameters on the PD characteristics and on the insulation lifetime which is the aim of this work.

In the first part, we have been investigating the effect of low pressure combined with high temperature on the partial discharge characteristics as the ignition voltage and the dissipated energy. Results show two different behaviours related to temperature at the left of the Paschen minimum. In an attempt to explain these results, it appears that this effect is related to the presence of two different breakdown phenomena. Then the domain of validity of two corrective expressions on the Paschen's law found in the literature, in case of changing the air environment was investigated. Results show that these corrections are valid under atmospheric pressure. However, for combined variation of temperature and pressure a new empirical expression has been added and validated for temperatures higher than 35°C. In a second part, the aeronautic environment effects on the partial discharge properties were investigated. The obtained noticeable changes in the PD characteristics with temperature, pressure and humidity variations were presented and mainly explained on the basis of electron mean free path. Finally, after having investigated the effect of temperature, pressure, and moisture on discharge characteristics, we focused on the effect of these environmental parameters on the behaviour of the energy dissipated by the discharges and on polyimide film endurance during aging under partial discharge. The energy measurements were carried out in real time during aging tests and the relationship between the energies involved and the polyimide lifetime was investigated for different environmental conditions. Accordingly to these results, it seems difficult to establish a direct relationship between the energy dissipated and the material lifetime, even if it still valid in various conditions. This is mainly due to the interaction between the discharge by-products and the environment that affects the film endurance. A more effective relationship between lifetime and the discharge intensity has been found. It has been shown that the lifetime and the discharge intensity are inversely proportional regardless of the applied conditions.

Keywords: Partial discharge, dissipated energy, mean free path, polyimide, electrical aging, lifetime.

Introduction générale...	15
Chapitre I Bienvenue à bord de l'avion plus électrique	21
I.1 Evolutions futures des aéronefs: Vers le tout électrique et le plus composite	21
I.1.1 Avions plus composites	22
I.1.2 Avion plus électrique	23
I.2 Généralités sur les sources d'énergies embarquées dans un aéronef	25
I.3 Evolution des réseaux embarqués	26
I.3.1 Automobile	26
I.3.2 De la Caravelle à l'A380 : 50 ans d'évolution	27
I.3.3 La voie du « tout » électrique	28
I.3.3.1 Le roulage à l'électrique	28
I.3.3.2 Le système de transmission de puissance du Trent XWB	29
I.3.3.3 Gain de masse	29
I.3.3.4 Le (futur) avion électrique à une place: le "macareux"	30
I.4 Contraintes environnementales	31
I.4.1 Pression	32
I.4.2 Température	32
I.4.3 Humidité	33
I.4.4 Densité de l'air	34
I.4.5 Conditions d'humidité en fonction de l'altitude	35
I.4.6 Variation des paramètres atmosphériques en environnement avion	35
I.5 Présentation du contexte industriel et scientifique	37
I.6 La naissance d'un projet à caractère industriel	38
Chapitre II Impact de l'environnement aéronautique sur les décharges partielles	43
II.1 Décharges électriques dans les gaz : LE PLASMA	43
II.1.1 Définition d'un plasma	43
II.1.2 Production d'un plasma	44
II.1.3 Paramètres physiques des plasmas	44
II.1.4 Notions élémentaires sur les plasmas	45
II.1.4.1 Collisions	45
II.1.4.2 Sections efficaces de collisions et libre parcours moyen	46
II.1.5 Processus physiques et mécanismes de formation des décharges électriques	48
II.1.6 Loi de Paschen : Rappel théorique	50
II.1.6.1 Etablissement de la Loi de Paschen	50
II.1.6.1.1 Premier coefficient de Townsend, définition	51
II.1.6.1.2 Premier coefficient de Townsend, lien avec la pression et le claquage	51
II.1.6.1.3 Deuxième coefficient de Townsend	53
II.1.6.1.4 La loi de Paschen	53
II.1.6.2 Influence du gaz et des électrodes sur la courbe de Paschen	55
II.1.6.3 Variation des conditions environnementales	56
II.1.7 Notion du champ disruptif	59
II.1.7.1 Champ électrique réduit	59
II.1.7.2 Influence de la géométrie des électrodes	60
II.1.8 Energie des décharges	61

Sommaire

II.1.9 Conclusion.....	63
II.2 Impact de l'environnement aéronautique sur les décharges dans l'air	63
II.2.1 Description du dispositif expérimental.....	64
II.2.2 Mode opératoire et protocoles expérimentaux	67
II.2.2.1 Essais en température-humidité.....	67
II.2.2.2 Essais en pression simulant des variations d'altitude.....	67
II.2.2.2.1 Pompage	67
II.2.2.2.2 Réglage de la distance interélectrodes.....	67
II.2.2.3 Mesure de la tension de claquage et de l'énergie dissipée	68
II.2.3 Résultats et discussions	70
II.2.3.1 Effet de la variation des paramètres environnementaux sur la partie droite de la courbe de Paschen.....	72
II.2.3.1.1 Variation de la distance interélectrodes.....	73
II.2.3.1.2 Variation de la pression	74
II.2.3.2 Effet de la variation des paramètres environnementaux sur la partie gauche de la courbe de Paschen.....	75
II.2.3.2.1 Calcul du libre parcours moyen.....	76
II.2.3.2.2 Identification des Mécanismes de décharges à gauche du minimum de Paschen	77
II.2.3.2.2.1 Pour des faibles valeurs de température : <i>Gaz mechanism</i>	77
II.2.3.2.2.2 Pour des valeurs de température élevées : <i>Vacuum mechanism</i>	79
II.2.3.2.3 Mesures de l'énergie dissipée par les décharges	80
II.2.3.2.4 Identification du régime de décharge à l'aide de la figure de Lissajous	81
II.2.3.3 Proposition d'un facteur de correction	83
II.2.3.3.1 Méthode de synthèse	83
II.2.3.3.2 Courbes simulées par la nouvelle formule empirique	86
II.2.4 Conclusion.....	87
Chapitre III Décharges Partielles : Etat de l'art.....	91
III.1 Décharge à barrière diélectrique.....	91
III.1.1 Principe et exemples de configuration	92
III.1.2 Etablissement de la tension d'initiation de la décharge	93
III.2 Etat de l'art : Décharges partielles.....	94
III.2.1 Classification des décharges partielles.....	94
III.2.1.1 Conséquences des décharges partielles.....	96
III.2.1.2 Caractérisation des décharges partielles.....	96
III.2.1.2.1 Décharges dans une cavité	96
III.2.1.2.2 Décharges couronnes.....	98
III.2.2 Méthodes de détection des décharges partielles.....	98
III.2.2.1 Détection ultrasonore	99
III.2.2.2 Détection radio	99
III.2.2.3 Détection optique	99
III.2.2.4 Détection électrique	99
III.2.2.5 La calibration de la mesure de charge des DP	101
III.2.3 Les grandeurs liées aux DP	101
III.2.3.1 Tension d'apparition et d'extinction des décharges partielles	101
III.2.3.2 Charge apparente.....	102
III.2.4 Techniques d'analyse des DP.....	103
III.2.4.1 Procédures	103
III.2.4.2 Operateurs statistiques : Skewness et Kurtosis	105

Sommaire

III.2.4.2.1	Définition	105
III.2.4.2.2	Applications aux analyses de la signature des DP	107
III.3	Présentation du dispositif expérimental	107
III.4	Conclusion	110
Chapitre IV	Décharges partielles dans les polymères en environnement aéronautique.....	113
IV.1	Définition d'un polymère.....	113
IV.2	Domaine d'application des polymères.....	114
IV.2.1	Généralités	114
IV.2.2	Domaine d'application des polyimides.....	115
IV.2.2.1	Propriétés et structure du polyimide BPDA/PDA	116
IV.2.2.1.1	Propriétés du BPDA/PDA.....	116
IV.2.2.1.2	Analyse de la structure chimique du BPDA/PDA	117
IV.3	Résultats et analyse	118
IV.3.1	Mise en œuvre du polyimide étudié.....	119
IV.3.2	Identification de la nature des défauts par analyse statistique	120
IV.3.2.1	Protocole expérimental	121
IV.3.2.2	Acquisition et traitement des données	124
IV.3.2.3	Conclusion	128
IV.3.3	Influence de l'environnement aéronautique sur les caractéristiques des décharges	128
IV.3.3.1	Effet de la pression	129
IV.3.3.2	Effet de la température.....	131
IV.3.3.3	Effet de l'humidité	133
IV.3.3.4	Effet de la distance.....	135
IV.3.3.5	Conclusion	137
IV.3.4	Comparaison entre décharge à barrière diélectrique et décharge entre deux électrodes métalliques.....	137
IV.3.4.1	Tension d'apparition des décharges et énergie dissipée	138
IV.3.4.2	Mécanismes de claquage	140
IV.3.4.3	Identifications du régime de décharge à l'aide de la figure de Lissajous	141
IV.3.4.4	Validité de la formule empirique	142
IV.4	Conclusion.....	143
Chapitre V	Impact de l'environnement aéronautique sur le vieillissement du polyimide.....	147
V.1	Vieillissement des polymères : Etat de l'art	147
V.1.1	Définition	147
V.1.2	Les mécanismes de vieillissement.....	148
V.1.3	Vieillissement électrique sous décharges partielles	149
V.1.3.1	Mécanisme de dégradation du diélectrique.....	150
V.1.3.2	Réactions chimiques entre le gaz et le diélectrique.....	151
V.1.3.3	Impact du vieillissement sur les caractéristiques des décharges	152
V.1.3.3.1	Nombre de décharges	152
V.1.3.3.2	Energie dissipée par les décharges	153
V.1.4	Vieillissement sous contraintes aéronautiques	154
V.1.4.1	Pression	155
V.1.4.2	Humidité.....	155
V.1.4.3	Température	156

Sommaire

V.1.4.4	Effet de la fréquence et de la tension	156
V.1.5	Prédiction de la durée de vie	158
V.1.5.1	La Loi exponentielle	158
V.1.5.2	La loi de puissance	159
V.1.5.3	La loi d'Arrhenius	159
V.1.5.4	Loi de Ramu	161
V.1.6	Conclusion.....	162
V.2	 Vieillessement du Polyimide sous conditions aéronautiques.....	162
V.2.1	Influence des différents paramètres sur l'énergie des décharges et sur la durée de vie du matériau	162
V.2.1.1	Protocole expérimental.....	162
V.2.1.2	Influence de l'environnement aéronautique sur le comportement de l'énergie dissipée	163
V.2.1.2.1	Résultats	163
V.2.1.2.2	Discussions	164
V.2.1.2.3	Analyse de la surface vieillie sous décharges sous CNTP	166
V.2.1.2.4	Synthèse : mécanisme de dégradation sous CNTP	168
V.2.1.3	Influence de l'environnement aéronautique sur la durée de vie.....	169
V.2.1.3.1	Effet de la variation de la température	169
V.2.1.3.2	Effet de la variation de la pression	171
V.2.1.3.3	Effet combiné de la température et de la pression.....	172
V.2.1.3.4	Effet de la variation de l'humidité.....	173
V.2.1.3.5	Effet de la variation de la distance et de la tension	173
A-	Durée de vie du matériau en fonction de la distance.....	174
B-	Durée de vie du matériau en fonction de la tension	174
C-	Synthèse.....	175
V.2.1.4	Synthèse des résultats.....	176
V.2.2	Prédiction de la durée de vie	177
V.2.2.1	Variation de la durée de vie en fonction de la température : Loi d'Arrhenius.....	177
A-	Pour un même niveau de tension.....	177
B-	Pour plusieurs niveaux de tension	178
V.2.2.1.1	Variation de la durée de vie en fonction de la tension: Loi de puissance	179
V.2.2.1.2	Variation de la durée de vie en fonction d'une combinaison température-pression : Loi de Ramu.....	180
V.2.3	Conclusion.....	182
Conclusion générale... ..		183
Annexes... ..		191
Publications personnelles... ..		203
Références bibliographiques... ..		205

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale...

50 m à 20 cm du sol, voilà le premier exploit de la grande aventure aéronautique !

Depuis ce premier vol effectué par Clément Ader le 9 octobre 1890, les progrès de la science ont permis de relever de nombreux défis scientifiques et techniques afin de permettre aux avions d'occuper un rôle important pour le transport de passagers ou de fret. Aujourd'hui l'avion est devenu un moyen de transport (presque) populaire. Pour maintenir voire accroître sa part de marché dans le secteur très concurrentiel des transports, l'aéronautique civile tente d'afficher des coûts d'exploitation toujours plus réduits.

Pour cela, l'exigence première des compagnies aérienne est centrée sur l'amélioration du rapport « charge embarquée / masse de l'avion » afin de répondre aux besoins d'un trafic en constante augmentation. En effet moins de masse structurelle, c'est la possibilité de transporter plus de passagers donc au final d'augmenter la rentabilité d'un avion. L'aspect environnemental acquiert quant à lui une importance croissante car le transport aérien est aujourd'hui montré du doigt par les spécialistes du climat pour contribuer au dérèglement climatique mondial du fait de ses émissions importantes de gaz à effet de serre. A ce titre, les avionneurs font de réels efforts pour optimiser la consommation énergétique des aéronefs.

Pour répondre favorablement à cette conjonction d'évènements, l'industrie aéronautique souhaite aujourd'hui relever le défi technique et scientifique du concept d'avion tout-électrique. Ce passage vers « *les avions plus électrique* » nécessite l'augmentation de la puissance électrique embarquée. Cette augmentation peut être réalisée en augmentant soit le courant, soit la tension. Néanmoins, l'augmentation du courant induit une augmentation de la taille des câbles et donc du poids. Pour répondre à ces conséquences coûteuses dans un système embarqué, une solution est d'augmenter la tension en passant d'un système à 115VAC/200VAC à un système 230VAC/400VAC. Cette augmentation du niveau de tension entraîne l'apparition des phénomènes défavorables aux *Systèmes d'Isolation Electrique* (SIE) tels que les décharges partielles (DP).

Tous les équipements électriques sont concernés ; quelle que soit la configuration du système d'isolation, tous sont assujettis aux phénomènes des DP si les conditions d'initiation sont réunies. Les décharges partielles et leurs effets sur les matériaux ont été un sujet de recherche depuis de longues années dans quelques laboratoires universitaires. Or, dans les spécifications relatives aux équipements électriques de l'avionique, jusqu'à très récemment, ce phénomène n'était pas pris en compte, compte tenu des faibles niveaux de tension utilisés. Néanmoins, l'augmentation de tension exigée dans les nouvelles générations d'avions combinée aux contraintes imposées par l'environnement avionique telles que baisse de pression liée à l'altitude, cycles de température et variation du taux d'humidité, risque de rendre l'existence de ces décharges inévitables, ce qui a suscité un nouvel intérêt d'une meilleure

compréhension de ces phénomènes dans un premier temps et des conséquences sur les SIE dans un second temps. Nos travaux de thèse s'inscrivent justement dans ce cadre au travers du projet ISS Power « *Innovative Solutions for Systems – Power* ».

Dès lors, tout le problème consiste donc, d'une part à mieux comprendre l'impact des contraintes spécifiques aux systèmes de l'avionique sur les phénomènes qui régissent le développement de la décharge, et d'autre part à quantifier expérimentalement l'impact de ces contraintes sur les caractéristiques de ces décharges et sur le vieillissement des isolants sous DP.

L'exposé des travaux de cette thèse est réparti comme décrit ci après.

Dans le premier chapitre, tout en rappelant les principales sources d'énergies traditionnellement utilisées, nous présentons succinctement l'évolution et l'intérêt de l'utilisation croissante de l'énergie électrique. Cette évolution a progressivement ouvert la voie vers l'*Avion Tout Electrique*, et ses conséquences constituent un des challenges à relever. Nous identifions les contraintes spécifiques liées au fonctionnement et à l'environnement du système de l'avionique notamment la variation des paramètres atmosphériques, susceptibles d'influencer l'initiation des décharges.

Le chapitre 2 sera divisé en deux parties. Dans la première partie, nous présenterons un rappel théorique sur la phénoménologie de la décharge. Nous rappellerons les principaux paramètres physiques, les phénomènes ainsi que les lois. La deuxième partie sera consacrée à la présentation et à la discussion des principaux résultats obtenus permettant la mise en évidence des effets de différents paramètres sur la courbe de Paschen ainsi que sur la nature des mécanismes régissant le développement des décharges dans cet environnement.

Le chapitre 3 présentera un état de l'art sur les décharges partielles. Nous nous attarderons plus précisément sur les différents types de décharges ainsi que sur les méthodes de détection utilisées.

Le chapitre 4 présentera dans une première partie une introduction générale sur les propriétés et le domaine d'application des polymères, en particulier le polyimide BPDA-PDA qui est le matériau choisi pour notre étude. La deuxième partie de ce chapitre abordera les résultats expérimentaux obtenus. Une étude sur l'identification de la nature des défauts, qui peuvent être présents dans les SIE, par une analyse statistique sera présentée. Puis l'impact de l'environnement aéronautique sur les caractéristiques des décharges (intensité, nombre) sera discuté. Pour terminer, une étude comparative entre le cas métal/métal et métal/isolant où l'une des deux électrodes est couverte par un diélectrique sera présentée.

La première partie du chapitre 5 développera brièvement un type de vieillissement, qui est le vieillissement électrique sous décharge partielle, en abordant ses effets sur les polymères

Introduction générale

isolants, ainsi que les lois utilisées pour la prédiction de la durée de vie. Une deuxième partie est consacrée à l'étude du vieillissement du PI soumis à des DP. Une étude sur l'influence des contraintes aéronautiques (P, T, Hr, U, d...) sur le vieillissement sous DP du polyimide BPDA/PDA sera présentée. Nous exploitons l'effet de ces paramètres sur le comportement de l'énergie dissipée par les décharges et sur la durée de vie du PI.

La conclusion générale permettra de faire la synthèse de nos objectifs et de nos principaux résultats, et proposer quelques perspectives.

CHAPITRE I. BIENVENUE A BORD DE L'AVION PLUS ELECTRIQUE

Chapitre I Bienvenue à bord de l'avion plus électrique

Comme dans de nombreux autres domaines qui accompagnent notre vie quotidienne, l'efficacité énergétique, le respect de l'environnement, la baisse des coûts de maintenance et de fonctionnement sont les exigences actuelles des compagnies aériennes.

Ces objectifs étant de plus en plus contraignants, ils imposent une révision complète de la distribution de l'énergie embarquée dans ces moyens de transport. L'énergie électrique y joue un rôle central car elle présente de nombreux avantages face à ses concurrentes plus classiques que sont les énergies hydraulique et pneumatique et qui nécessitent des systèmes de tuyauteries lourdes et complexes. Grâce aux progrès réalisés depuis des années, la distribution de l'énergie sous forme électrique est devenue à moindre coût synonyme de gain de masse, d'une flexibilité et d'une fiabilité accrue. Dans un aéronef, la tendance est donc clairement d'aller vers le *Plus Electrique* voire le *Tout Electrique*. Dans ce chapitre, tout en rappelant les principales sources d'énergies traditionnellement utilisées, nous présentons succinctement l'évolution et l'intérêt de l'utilisation croissante de l'énergie électrique ainsi que les contraintes spécifiques liées au fonctionnement et à l'environnement du système de l'avionique. De ces évolutions associées à ces contraintes, nous dégagerons les problématiques envisagées dans ce travail de thèse et le cadre dans lequel elles seront traitées.

I.1 Evolutions futures des aéronefs: Vers le tout électrique et le plus composite

L'avion est aujourd'hui devenu un moyen de transport très répandu. L'exigence première des compagnies aérienne est actuellement centrée sur l'amélioration du rapport « charge embarquée/masse de l'avion » afin de répondre aux besoins d'un trafic en constante augmentation. En effet moins de masse structurelle, c'est la possibilité de transporter plus de passager donc au final d'augmenter la rentabilité d'un avion.

Cela permet de répondre de plus à un second intérêt lié aux questions énergétiques qui commencent à se poser, les plus ardues étant la fin proche des stocks d'énergie fossile et l'augmentation des émissions de CO₂. Une démarche environnementale visant à réduire fortement l'émission ou l'utilisation de produits polluants s'impose donc. Le transport aérien moderne doit s'appuyer ainsi sur des avions qui affichent un rapport consommation de carburant / nombre de passagers transportés le plus favorable possible.

Pour répondre à ces nouveaux défis scientifiques et technologiques, l'industrie aéronautique travaille actuellement sur deux programmes de recherche majeurs. Le premier désigné par le nom générique d'avion « tout composite » et le deuxième concept est désigné par le nom « avion plus électrique ».

I.1.1 Avions plus composites

Les matériaux composites sont utilisés depuis des décennies dans l'aviation commerciale.

Les matériaux composites utilisés en aéronautique sont généralement produits en combinant des couches de fibres de carbone ou de verre avec de l'époxy.

Plus que les éventuels gains de masse et de rigidité de la structure, c'est surtout en terme d'entretien que les avionneurs privilégient cette solution.

Avant le milieu des années 1980, les constructeurs utilisaient des matériaux composites dans des parties secondaires de la structure de l'avion (ex : les bords des ailes) et pour les surfaces de contrôle (volets, ailerons). En 1988, Airbus en lançant l'A320, a produit le premier avion commercial avec une queue entièrement en composite. En 1995, Boeing a suivi avec son B777, équipé lui aussi d'une queue en composite. Et depuis 2011, des avions commerciaux de grande capacité construits majoritairement en matériaux composites entrent en opération. C'est le cas par exemple du **Boeing 787** qui est le premier gros porteur commercial construit majoritairement en composite et entré en opération en octobre 2011. Les matériaux composites représentent 50% du poids de l'appareil (hors moteur) [FRE11]. Pour une mise en service ultérieure, l'**Airbus A350** est annoncé avec 52% du poids total de l'avion en matériaux composites.

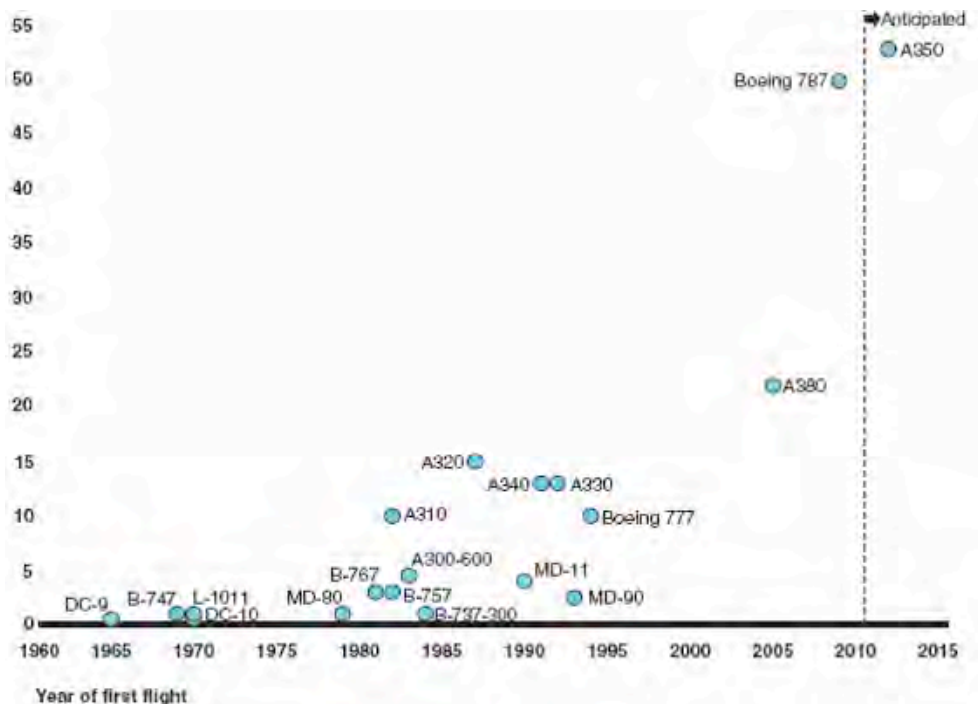


Figure I.1 Evolution du pourcentage de composite dans les avions [GAO].

Le monde de l'industrie aéronautique s'inquiète de l'état des connaissances de cette technologie appliquée à l'aviation commerciale, et du niveau de préparation des Autorités de l'Aviation Civile à cette transition technologique. Les Autorités de l'aviation américaine et européenne sont en train de prendre des mesures de manière à répondre à tous les défis de sécurité liés à l'utilisation de matériaux composites dans la structure d'un avion.

I.1.2 Avion plus électrique

L'utilisation de l'électricité dans le monde aéronautique n'est pas récente. Mais, progressivement, les avionneurs ont manifesté un profond souhait d'élargir son utilisation à l'ensemble des fonctions remplies à bord des avions. L'électricité y prend ainsi une place prépondérante dans le schéma énergétique, notamment dans la distribution interne d'énergie. Le besoin en puissance électrique est de plus en plus croissant comme l'illustre la Figure I.2. La technologie électrique s'est avérée être très flexible, très efficace en matière de transmission de puissance et offre des possibilités de contrôle et de management beaucoup plus simples et surs [TRW01], ce qui pourrait entraîner l'abandon progressif de l'énergie hydraulique ou pneumatique à bord des aéronefs : c'est le concept de l'avion «*tout électrique*».

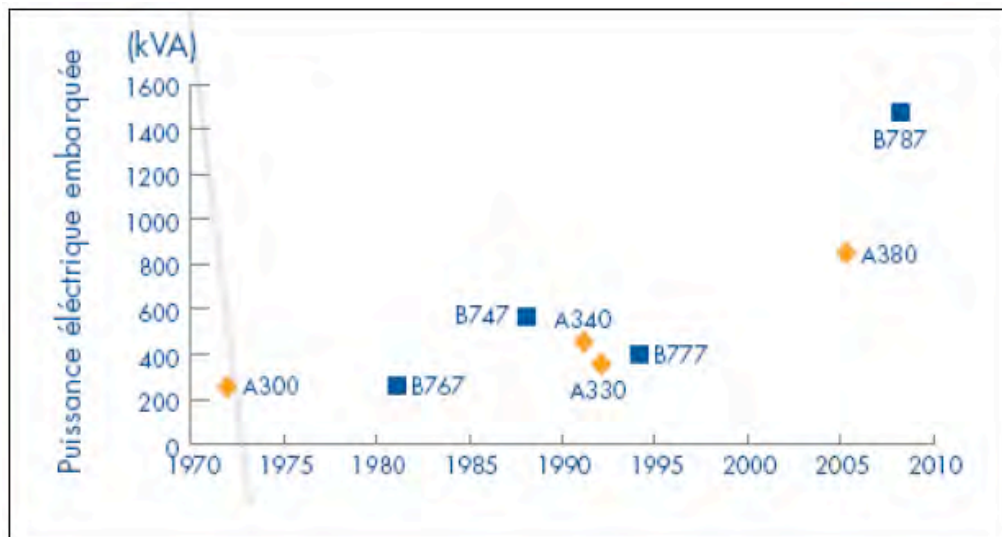


Figure I.2 Evolution de la puissance électrique embarquée [SOL05].

Alors, donner naissance à une chaîne de l'énergie électrique assurant aux futures générations d'avions civils et militaires des performances optimisées, c'est l'enjeu majeur de l'industrie aéronautique de demain. Quelles sont les tâches accomplies afin d'atteindre cet objectif ? et quelles seront les tâches de demain ?

Aujourd'hui, l'avion plus électrique commence à être une réalité :

- L'airbus A380 est équipé du premier système d'actionnement électrique pour inverseurs de poussée ETRAS ce qui était une nouveauté en 2005.



- Sur le tout nouveau Boeing 787, le calculateur EBAC contrôle le système d'actionnement du frein électrique.



De plus sur le B787 «Dreamliner», Boeing a supprimé la pressurisation de la cabine ainsi que le dégivrage des ailes à partir de l'air chaud prélevé sur les réacteurs, ces fonctions étant désormais assurées par des compresseurs électriques fonctionnant en circuit fermé.

Comme on le voit, les aéronefs de nouvelle génération disposent d'une quantité de fonctions faisant appel au «tout électrique» (voir figure I.3). Et il est vraisemblable que les futurs avions seront imaginés avec l'ensemble des fonctions en mode électrique à l'exception du mode de propulsion.

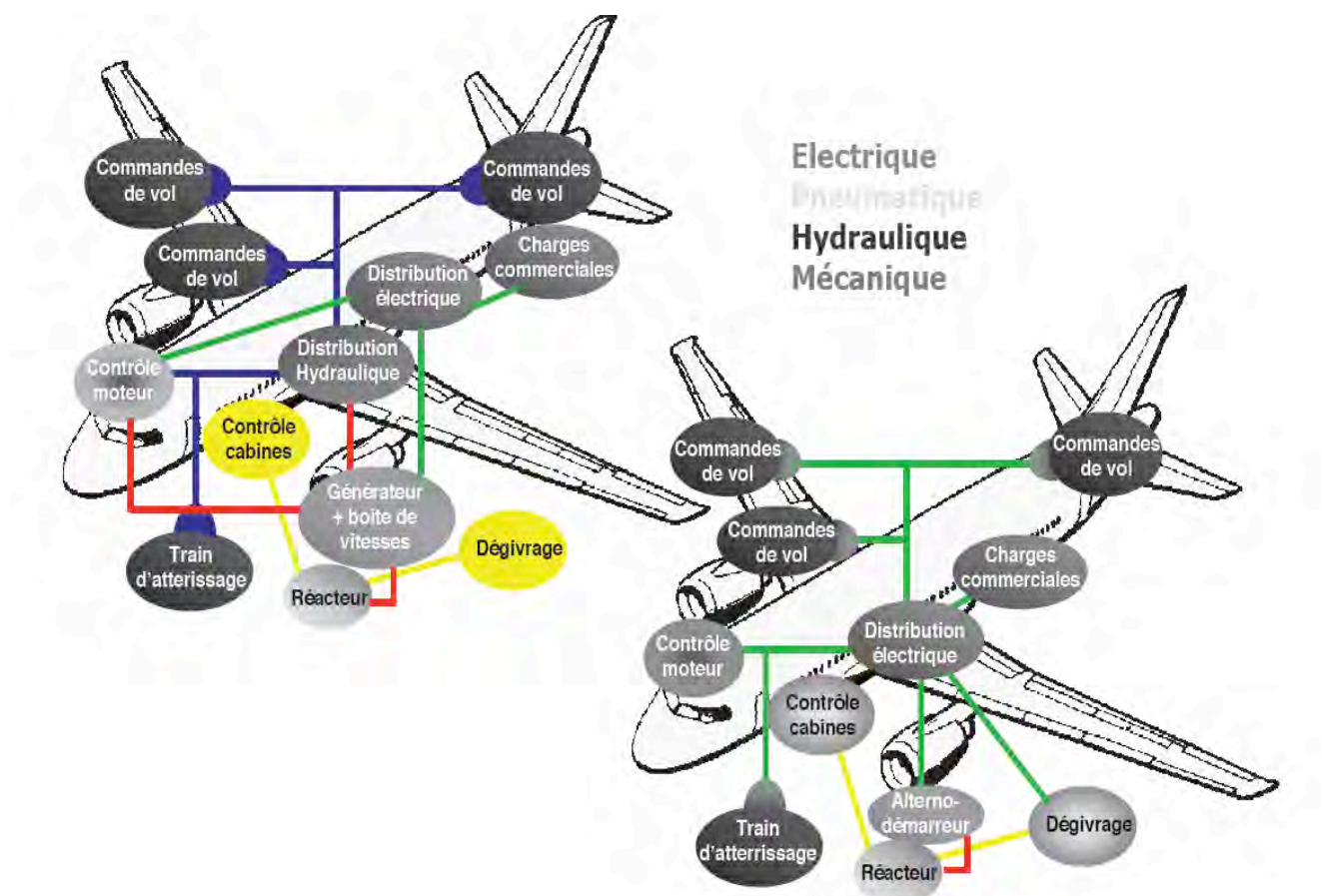


Figure I.3 Une comparaison entre l'architecture conventionnelle type A330 et l'architecture d'un futur gros porteur civil.

I.2 Généralités sur les sources d'énergies embarquées dans un aéronef

Outre l'énergie principale fournie par les moteurs pour assurer la propulsion, de nombreuses fonctions de l'avion exigent des besoins en énergie dite « secondaire » pour garantir le bon déroulement du vol. Cette énergie secondaire permet notamment d'actionner les gouvernes de vol ; elle sert aussi à l'alimentation des appareils de navigation et de contrôle, ou encore des cuisines (fours...), de l'éclairage, climatisation, etc... Plusieurs formes d'énergie peuvent être utilisées pour alimenter ces charges : l'énergie hydraulique, pneumatique ou électrique. Les moteurs de l'avion alimentent divers équipements permettant de générer ces différentes sources d'énergie.

Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique peut être transportée par les liquides sous forme hydrostatique. Elle se fait à pression élevée (200 bar à 300 bar) et faible vitesse (10m/s). Le circuit hydraulique d'un avion est essentiellement composé d'une génération hydraulique centralisée (un réservoir, des pompes et des accumulateurs), d'un réseau de distribution et des équipements consommateurs que sont essentiellement les actionneurs. Elle est utilisée pour alimenter les trains d'atterrissage, les freins, les commandes de vol et les inverseurs de poussée.

L'inconvénient que présente cette source d'énergie est la fuite éventuelle du liquide hydraulique connu sous le nom commercial de Skydroll® LD4. En effet, lors d'un vol toute fuite de Skydroll® est considérée comme un problème majeur immobilisant l'appareil jusqu'à ce que la fuite soit réparée et que tous les systèmes touchés par les éclaboussures soient systématiquement remplacés.

Energie pneumatique :

La source d'énergie pneumatique provient dans les avions actuels dits « bleed » de prélèvements sur les moteurs principaux et permet le dégivrage des bords d'attaque voilures et nacelles, la pressurisation et le conditionnement cabine. Au sol elle peut provenir d'un groupe extérieur branché à l'avion, ou bien de l'APU (également utilisé en secours en vol). Au sol l'APU fournit l'air de la climatisation, et l'électricité qui va permettre la mise en fonctionnement de l'appareil. Toute l'énergie pneumatique provenant de l'APU va être monopolisée par le démarrage de l'avion. En plus, elle est utilisée pour alimenter les systèmes de pressurisation de la cabine, et de dégivrage des ailes.

Les inconvénients que présente cette source d'énergie sont les fuites difficiles à localiser ainsi que le diamètre important des tuyauteries utilisés.

Énergie électrique :

L'énergie électrique est fournie par un alternateur entraîné mécaniquement par la rotation de l'arbre du réacteur. Les fonctions de l'énergie électrique sont nombreuses et variées, et comme indiqué précédemment en perpétuelle augmentation. La transmission de puissance sous forme électrique présente une grande flexibilité en ce qui concerne la définition du réseau de distribution ainsi qu'un rapport puissance transmissible sur masse intéressant pour la distribution [MAR99]. Elle assure le fonctionnement des systèmes de navigation et des systèmes cabines, lumières, cuisine, écrans...

Son principal inconvénient vient du rayonnement électromagnétique émis par l'électricité transportée qui peut être néfaste pour les signaux de commande et pour les appareils de navigation.

I.3 Evolution des réseaux embarqués

Avant propos, il est utile de rappeler ce qu'est un réseau embarqué [RET03] et ses spécificités. En opposition au réseau de distribution public, il se différencie par une faible puissance de court-circuit et par l'alimentation de systèmes isolés. Dans la littérature, on parle aussi de réseau d'alimentation ou de bord suivant les systèmes étudiés. Ces derniers sont nombreux. Voitures, avions, navires, tramways voire les réseaux industriels, constituent des cas d'application où le réseau électrique fonctionne partiellement ou continûment de manière isolée. Depuis les années 80, le virage vers le « plus électrique » dans les différents systèmes embarqués a pris une réelle importance, dans les véhicules de transport comme dans une automobile ou un avion.

I.3.1 Automobile

Le mode de transport le plus utilisé dans les pays développés est très représentatif de la migration vers le « plus électrique ». Les chiffres de Renault sont éloquentes ; en 1980 une Renault 5 consommait une puissance électrique inférieure à 500W alors qu'en 2005, le monospace de la gamme consommait 5kW, soit dix fois plus en 25 ans. Certains « visionnaires » de l'automobile parlent même d'atteindre 40kW en 2030 !

Les causes de cette croissance exponentielle sont principalement issues de quatre facteurs : le confort, la sécurité, l'environnement, et le coût.

En effet, améliorer sa qualité de vie et son confort sont des causes communes à bien des personnes et cela passe pour certains par son propre véhicule. Les constructeurs proposent ainsi des prestations variées. Sièges chauffants, vitres électriques, GPS, climatisation, direction assistée deviennent des accessoires standardisés. Ces équipements sont les plus grands consommateurs d'énergie électrique.

I.3.2 De la Caravelle à l'A380 : 50 ans d'évolution

Dans les années 50, le premier avion civil long courrier (la Caravelle SE 210, 80 passagers) consommait environ 27kW avec une distribution électrique sous 28V en continu. A l'époque, l'ensemble des commandes était hydraulique et mécanique. Début 70, Airbus commercialise l'A300 (260 passagers) et la consommation est de 250 kW avec une distribution complètement revue. Depuis les années 80, les avions de la gamme d'Airbus tels que l'A320 qui consomme 300KVA, sont dits « à commande électrique », c'est à dire qu'il n'y a plus de liaisons mécaniques entre les leviers de commande du pilote et les servocommandes. Les actionneurs des commandes de vol sont à puissance hydraulique, mais commandés électriquement par le concept de « *Fly by Wire* » [BAR05]. De plus, l'avionique, c'est à dire l'ensemble des équipements électroniques, électriques et informatiques qui aident au pilotage des aéronefs à bord devient entièrement numérique (Figure I.4).

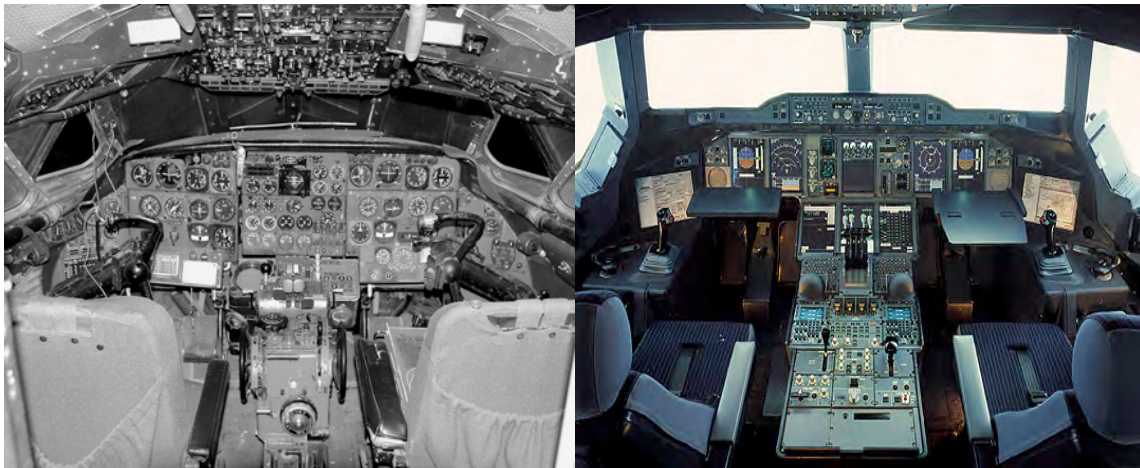


Figure I.4 A gauche, cockpit de la Caravelle, à droite celui de l'A380 ; 50ans d'évolution.

Dans le même temps, le confort et la sécurité ne font que croître au fil des avions. Sièges électriques, vidéo, cuisines, prises de courant... viennent améliorer la vie du passager.

Quant à la sécurité et à la souplesse de fonctionnement : actionneurs, capteurs, dégivrage, freinage, ne sont que quelques exemples de la montée en puissance des systèmes électriques.

C'est l'A380 qui marque le plus l'histoire de l'aéronautique, par sa taille, et surtout par son architecture qui se différencie nettement des précédentes et traduit le souhait de l'avionneur d'aller vers le « plus électrique ». De nombreuses avancées technologiques ont été accomplies avec l'A380. La première grande avancée concerne le remplacement du troisième circuit hydraulique par un circuit électrique. Le fait de n'avoir que deux circuits hydrauliques principaux et de remplacer le troisième circuit hydraulique classique par un secours électrique peut être un facteur de diminution de masse. Une autre avancée présente dans l'A380 est l'utilisation de 4 VFG (« *Variable Frequency Generator* ») de 200kVA chacun. L'amplitude de la tension AC délivrée n'a pas été modifiée (elle est toujours de 115V AC/200V AC) mais la fréquence des bus AC n'est plus régulée à 400Hz. Elle dépend directement des conditions de vol et varie entre 360Hz et 800Hz. Enfin, du point de vue de la puissance installée à bord,

elle passe à 800kW avec l'utilisation des 4 **VFG**. [LAN05].

La prochaine étape sera le passage à des tensions plus élevées. Les 115 Volts alternatifs installés actuellement feront place aux 230 Volts alternatifs, car le système électrique du futur avion plus électrique est plus susceptible d'être constitué de deux moteurs, chacun ayant deux générateurs produisant chacun 250KVA. En outre, il inclurait un APU avec deux autres générateurs de 225kVA chacun. Prévu pour le futur Boeing 787 [BOE07], ceci représente donc une puissance embarquée voisine de 1500kVA. Une comparaison du système électrique d'un avion traditionnel Boeing et le nouveau Boeing 787 est présentée sur la Figure I.5.

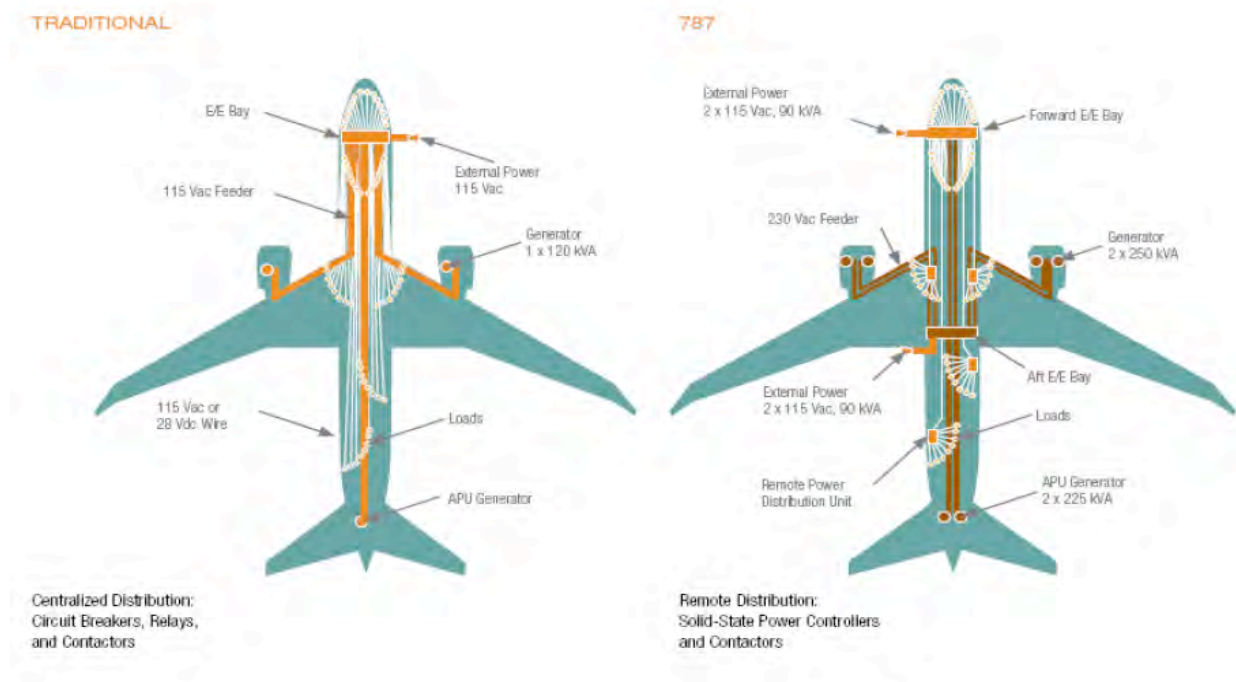


Figure I.5 La génération électrique et le système de distribution d'un Boeing traditionnel et le Boeing 787 [BOE07].

C'est ainsi que les avionneurs annoncent une nouvelle génération d'aéronefs: le Boeing 787 « *Dreamliner* » et l'Airbus A350, qui ouvrent la voie vers le « *tout électrique* » [FRA08].

I.3.3 La voie du « tout » électrique

I.3.3.1 Le roulage à l'électrique

L'une des pistes actuelles, concerne ce qu'on appelle déjà le «Green taxi», qui permettra le déplacement au sol de l'avion sans la propulsion des moteurs principaux. Grâce à des moteurs électriques placés dans les roues des trains d'atterrissage principaux, l'avion pourra avancer (et même reculer !) sur les pistes, ce qui représentera jusqu'à 5 % de réduction de la consommation de carburant et des émissions polluantes d'un avion court-moyen courrier, soit par exemple 65 000 tonnes de CO₂ évitées par an à l'aéroport de Paris Charles de Gaulle.

Le second avantage sera la réduction de la maintenance de moteurs, car ceux-ci aspirent parfois des éléments extérieurs se trouvant sur le tarmac. L'adjonction de moteurs électriques directement sur le train d'atterrissage d'un avion lui permettant de rouler à 40 km/h avec une puissance de 150 kW est actuellement en développement et des essais grandeur nature devraient avoir lieu au cours de l'année 2013.



Figure I.6 Le Green taxi

I.3.3.2 Le système de transmission de puissance du Trent XWB

Le système de transmission de puissance du Trent XW, moteur qui équipera le futur Airbus A350 XWB, sert à prélever une part de la puissance du moteur pour la distribuer à différents équipements nécessaires au fonctionnement du moteur et de l'avion, comme la pompe à carburant ou les générateurs électriques. C'est un système complexe et critique, qui intègre plus de 400 références de composants répartis en plusieurs sous-systèmes : prise de puissance moteur (Internal GearBox), boîte de renvoi d'angle (Step Aside GearBox), boîtier d'accessoires (Accessory GearBox) et réservoir d'huile. Si l'on compare les performances de la transmission de puissance du moteur Trent XWB à celles équipant son prédécesseur, le moteur Trent 700, le rapport masse/puissance transmise est réduit d'un facteur deux. L'avionneur européen qui a testé, avec succès en février 2012, le moteur **Trent XWB de Rolls Royce** qui équipera l'**A350-900**, affirme que le moteur a parfaitement fonctionné et a démontré de bonnes performances en termes de consommation de carburant et de bruit. La structure de l'A350 XWB est composée à 53% de matériaux composites, notamment dans des éléments majeurs tels que la voilure et le fuselage. Il est destiné à concurrencer les avions américains **Boeing 777** et le nouveau **787 Dreamliner**.

I.3.3.3 Gain de masse

La chaîne de l'énergie embarquée sur les prochaines générations d'avions sera radicalement transformée, et principalement axée autour des systèmes électriques. Cette évolution technologique consistera à substituer aux circuits multimodaux actuels (mécaniques, hydrauliques et pneumatiques) des circuits électriques gouvernant l'ensemble des fonctions de

l'appareil, au sol comme en vol.

L'un des avantages de ce mode d'alimentation électrique est le gain de masse. En effet, la future génération d'avion de ligne sera plus électrique avec moins de circuits hydrauliques, de pompes, moins de lourds tuyaux qui laisseront la place à un câblage plus léger, allégeant ainsi le poids des aéronefs.

De plus, les ingénieurs travaillent sur la mutualisation d'énergie délivrée par les trois sources secondaires de l'appareil (alimentées par les réacteurs) : pneumatique, hydraulique et électriques. Actuellement ces trois énergies ne sont pas transférables d'un poste de consommation à un autre. Ainsi, la puissance hydraulique nécessaire pour manipuler le train d'atterrissage ne sera utilisée que quelques minutes lors du décollage et de l'atterrissage et aucunement utilisée en vol. Grâce à l'énergie électrique, il devient possible de commuter les divers éléments pour utiliser la même source d'énergie d'un équipement à un autre selon les phases du vol : ainsi, on ne démultiplie plus les systèmes, mais on leur donne différentes fonctions.

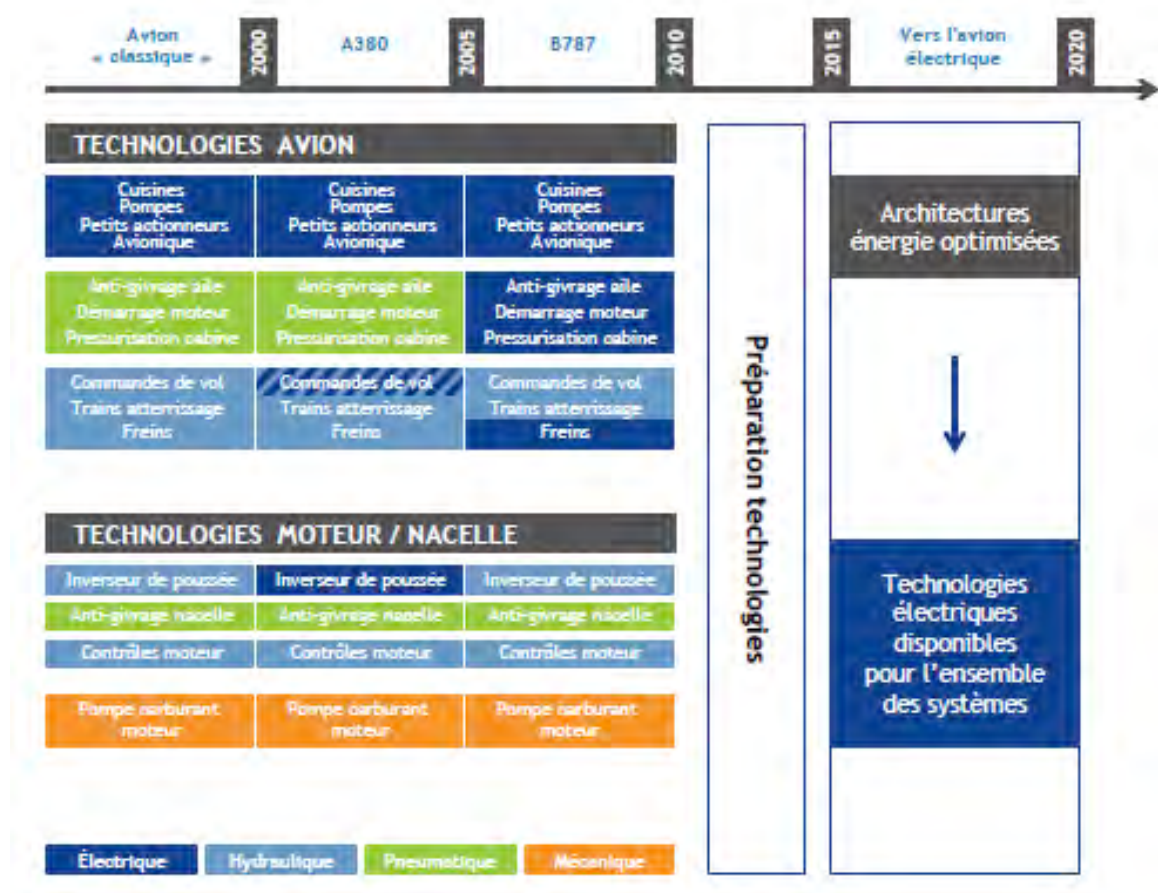


Figure I.7 L'évolution de l'architecture des avions [SAF]

I.3.3.4 Le (futur) avion électrique à une place: le "macareux"

L'idée en est encore au stade de concept mais pourquoi ne pas imaginer qu'un jour, dans les grandes villes, les livraisons urgentes et les transports rapides se feront dans les airs grâce à

un petit avion électrique comme celui qu'ont imaginé des ingénieurs de la Nasa (Langley Research Center) avec d'autres centres de recherches. Propulsé par un moteur électrique, ce véhicule à une place décolle et se pose verticalement. Conçu en fibre de carbone, il pèse 135 kilos et mesure 3,7 mètres de long pour 4,1 mètres d'envergure. A cela s'ajoute 45 kilos de batteries. Grâce à son moteur électrique, il est très silencieux et devrait voler à 240 km/h.

Au sol, l'avion repose sur quatre pattes – ce sont les ailes arrière qui se rejoignent pendant le vol (voir Figure I.8). Le pilote s'installe quasiment debout dans l'avion. Après avoir quitté le sol, l'avion s'incline et prend une position horizontale pendant le vol, offrant au pilote un point de vue imprenable. Son petit nom est Puffin, autrement dit «le macareux».



Figure I.8 Le futur avion électrique personnel

Un prototype de démonstration (mesurant un tiers de la taille finale) doit être fabriqué durant l'année 2012 pour mener des tests. Pour l'heure, les batteries au lithium lui donneraient une autonomie de vol d'environ 80 kilomètres. Cependant les chercheurs pensent atteindre 240 à 320 km d'ici 2017 grâce à l'amélioration attendue des batteries. Silencieux, léger, furtif puisqu'il dégage peu de chaleur et échappe ainsi à la détection radar, cet avion intéresse aussi l'armée et la sécurité civile [MAC10].

Comme on le voit, l'électrification de nombreuses fonctions dans un aéronef est inéluctable. Cela s'accompagne d'une augmentation notable du niveau de puissance requise à bord, sans perdre de vue qu'un avion, par ses conditions naturelles de fonctionnement, induit des contraintes particulières sur tous ses éléments constitutifs, en particulier sur les systèmes électriques. Ces contraintes sont rappelées dans le paragraphe suivant.

I.4 Contraintes environnementales

L'environnement aéronautique est caractérisé par la variation des paramètres atmosphériques liée d'une part au changement d'altitude et d'autre part à la localisation de l'équipement (au

sol ou en vol, ou par exemple à proximité des réacteurs où la température est élevée). Ces paramètres se définissent comme suit :

I.4.1 Pression

Dans l'hypothèse hydrostatique, en un point donné de l'atmosphère, la pression atmosphérique correspond au poids de la colonne d'air sur une unité de surface. La pression moyenne au niveau de la mer est de 760 Torr. À mesure que l'on s'élève, le poids de la colonne d'air diminuant, la pression diminue d'un facteur 10 tous les 15 km. L'O.A.C.I. (*Organisation de l'Aviation Civile Internationale*) a défini une loi de variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude présentée par l'expression suivante :

$$p(h) = 760 \left(1 - \frac{0,0065 * h}{288,15}\right)^{5,255} \quad \text{I.1}$$

A partir de cette équation, il est possible de tracer une courbe reliant la pression atmosphérique à l'altitude dans une atmosphère normalisée.

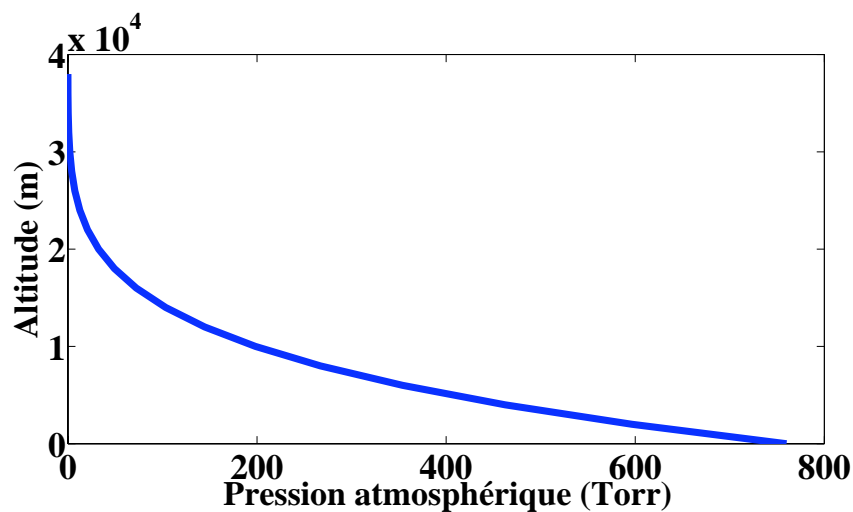


Figure I.9 La pression atmosphérique dans une atmosphère normalisée selon l'OACI.

Intuitivement, cette diminution de pression avec l'augmentation de l'altitude s'explique par la raréfaction des particules d'air. Cette propriété est utilisée pour mesurer l'altitude d'un avion par une simple conversion pression-altitude dans un instrument appelé altimètre.

I.4.2 Température

La température d'un système est une fonction croissante du degré d'agitation thermique des particules, c'est-à-dire de son énergie thermique. Comme la pression, la température de l'air

joue également un rôle important en aéronautique puisqu'elle influe à la fois sur la densité de l'air et sur sa composition. En règle générale, elle diminue avec l'altitude, d'environ 2°C tous les 300 m.

Au cours de son service commercial l'aéronef pourra être confronté à des températures allant de -40°C (climats polaires) jusqu'à 50°C (stationnement sur un tarmac en zone désertique chaude). En vol, la limite inférieure est encore plus faible, puisqu'à une altitude de croisière de 50 000 pieds (soit environ 15000 m) la température descend jusqu'à -60°C. En revanche, les équipements électriques localisés à proximité des réacteurs sont assujettis à des températures élevées allant jusqu'à 200°C, quelle que soit l'altitude. La norme aéronautique DO160 prévoit « des susceptibilités » liées à la variation de la température en altitude. Plusieurs procédures d'essais sont définies selon cette variation (Figure I.10, 1ft ≈ 0.3m) pour caractériser les performances de l'équipement selon son utilisation et le profil de vol.

Altitude(ft)

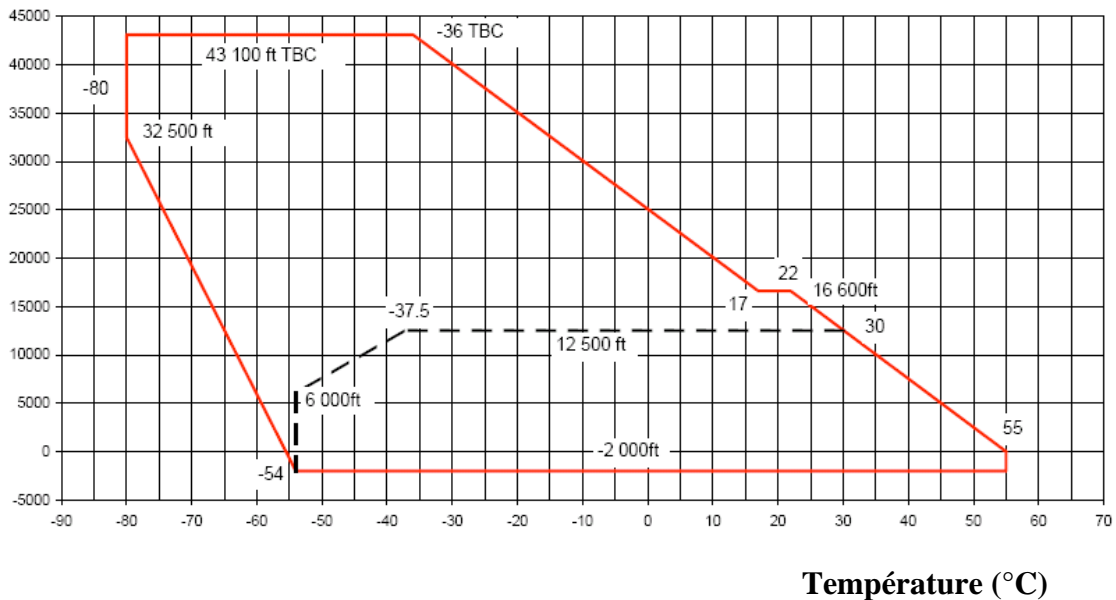


Figure I.10 Variation de la température en environnement avion.

I.4.3 Humidité

L'air qui nous entoure renferme toujours une proportion d'eau sous forme de vapeur ; on quantifie cet air « d'air humide ». On peut donc définir l'humidité comme étant la quantité d'eau sous forme de vapeur, exprimée en gramme, contenue dans un mètre cube d'air (g/cm^3). Le taux d'humidité dans un volume d'air est généralement exprimé à partir d'un des paramètres suivants :

L'humidité relative de l'air :

Couramment notée ϕ , elle correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport changera si on change la température ou la pression bien que l'humidité absolue de l'air n'ait pas changé. L'humidité relative est souvent appelée degré hygrométrique. Exprimée le plus souvent en pourcentage, son expression devient :

$$\Phi (\%) = (P_{\text{vap}} / P_{\text{sat}}(T)) * 100 \quad \text{I.1}$$

L'humidité absolue :

On appelle humidité absolue d'un air humide, le rapport entre la masse m_v de vapeur d'eau et la masse m_{as} d'air sec contenues dans un volume quelconque V d'air humide. Elle est limitée par la quantité maximale que le gaz peut absorber avant qu'il y ait saturation à la température de celui-ci.

$$x = \frac{m_v}{m_{\text{as}}} \quad \text{I.2}$$

Cette humidité absolue s'exprime en kilogramme d'eau par kilogramme d'air sec.

Le point de rosée :

Le **point de rosée** ou **température de rosée** est une donnée thermodynamique caractérisant l'humidité dans un gaz. Le point de rosée de l'air est la température à laquelle la pression partielle de vapeur d'eau est égale à sa pression de vapeur saturante. Si l'air humide est progressivement refroidi, la température de rosée correspond à l'apparition d'eau sous phase liquide.

I.4.4 Densité de l'air

En se basant sur « **IEC procédure** » [IEC89], la densité de l'air δ est définie comme le rapport de la densité de l'air durant le test sur celle obtenue dans les conditions normales de température (293K) et de pression (760Torr), alors :

$$\delta = \frac{293}{T} \times \frac{p}{760} \quad \text{I.3}$$

p et T étant respectivement la pression et la température de l'air au moment considéré.

I.4.5 Conditions d'humidité en fonction de l'altitude

En fonction de l'altitude, la quantité d'eau rapportée à la quantité d'air sec qui la contient est définie par l'équation :

$$r = a \times (\ln z)^2 + b \times \ln z + c \quad \text{I.4}$$

a , b et c étant des paramètres dépendant du type de mission : polaire, tropicale,... Le Tableau I.1 issu des données Airbus donne les valeurs de ces paramètres, l'altitude z étant exprimée en mètre et r en g/kg.

Type de mission	a	b	c
Polar Mission (PM)	$-3,1115.10^{-3}$	$-1,556.10^{-2}$	0,4245
Tropical Mission TM	$-4,320.10^{-1}$	1,855	20,20
Allowable Maximum Hot Day (AMHD)	$-3,969.10^{-2}$	$6,189.10^{-2}$	2,9107
Structural Maximum Hot Day (SMHD)	$-4,612.10^{-2}$	$1,770.10^{-1}$	2,3954
Standard Day (SD)	$-4,732.10^{-2}$	$1,2570.10^{-1}$	5,2870

Tableau I.1 Valeurs des paramètres de profil de mission

La variation de l'humidité en fonction de l'altitude extrapolée dans la Figure I.11 dépendra donc du type de mission.

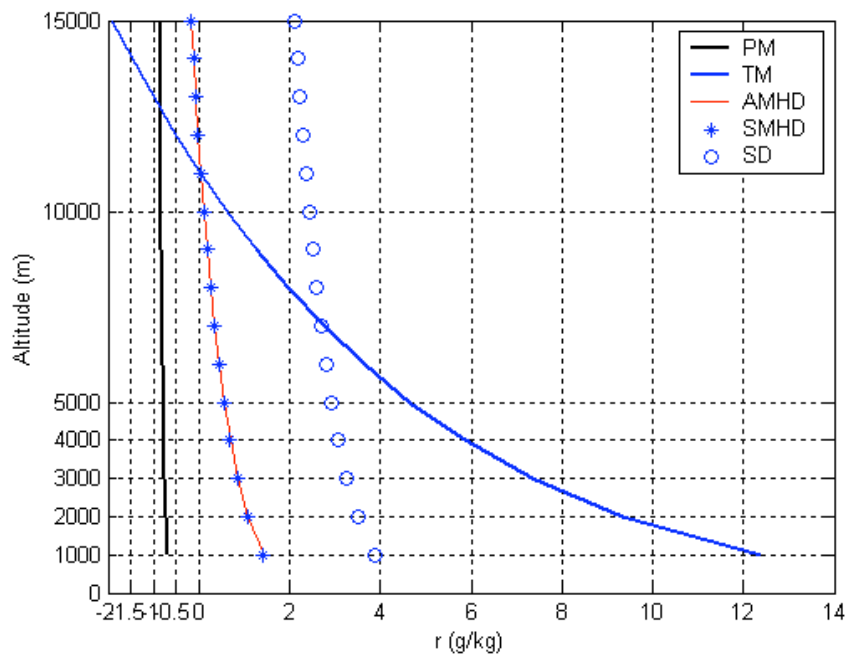


Figure I.11 Profil de la variation d'humidité en altitude

I.4.6 Variation des paramètres atmosphériques en environnement avion

Chapitre I. Bienvenue à bord de l'avion plus électrique

Le fonctionnement des systèmes électriques à bord des aéronefs est soumis à d'incessantes variations des paramètres atmosphériques liées, d'une part à l'altitude et, d'autre part, à la localisation du système dans l'avion. Ainsi, comme le montre le Tableau I.2, les normes définissent des « zonning » pour identifier les contraintes environnementales en fonction de la situation des équipements [ABD].

Conditions	Reference	Fuselage	Fuselage (Avionics bay racks)	Tail cone	Wing and THS	Engine & Nacelle	Unpressurised protected areas ³	Hardware fitted externally
Operational Temperature	ABD0100.1.2 DO160E	-15°C to +55°C	-15°C to +70°C	-55°C to +120°C ⁴	-55°C to +70°C	-55°C to +180°C ⁵	-55°C to +70°C	-55°C to +70°C
Ground Survival Low Temperatures	ABD0100.1.2 DO160E	Survival -55°C Startup at -40°C	Survival -55°C Startup at -40°C	-55°C	-55°C	-55°C	-55°C	-55°C
Ground Survival High Temperatures	ABD0100.1.2 DO160E	Soak at +85°C Startup at +70°C	Soak at +85°C Startup at +70°C	Soak at +85°C	Soak at +85°C Startup at +70°C	Soak at +85°C	Soak at +85°C Startup at +70°C	Soak at +85°C Startup at +70°C
Altitude/pressure	DO160E	0.57 to 1.83 bar	0.57 to 1.83 bar	0.116 to 1 bar	0.116 to 1 bar	0.116 to 1 bar	0.116 to 1 bar	0.116 to 1 bar
Temperature variation	DO160E	2°C/min	2°C/min	5°C/min	5°C/min	5°C/min	5°C/min	10°C/min
Humidity	DO160E	50°C, 95% RH	50°C, 95% RH	65°C, 95% RH	65°C, 95% RH	65°C, 95% RH	65°C, 95% RH	55°C, 95% RH
Shocks	DO160E	6g / 20ms pulse	6g / 20ms pulse	6g / 20ms pulse	6g / 20ms pulse	6g / 20ms pulse	6g / 20ms pulse	6g / 20ms pulse
Operational vibrations	ABD0100.1.2 DO160E	See Appendix 3 (curve C)	See Appendix 2	See Appendix 3 (curve C)	See Appendix 3 (curve E)	See Appendix 4 (curve W)	Other zone, as appropriate	Other zone, as appropriate

³ these areas include the wing trailing edge, THS trailing edge, the vertical stabiliser, the belly fairing, the landing gear bays.

⁴ To be confirmed with APU manufacturer

⁵ To be confirmed with the engine manufacturer

Tableau I.2 Valeurs récapitulatives des variations des paramètres atmosphériques en fonction de leur zoning

Le Tableau I.2 donne les valeurs de température ambiante dans les différentes zones de l'avion. La localisation de ces zones sur avion est présentée sur la Figure I.12.



Figure I.12 Schématisation des différentes zones dans un aéronef.

Les développements récents permettent d'envisager une évolution à court terme vers *l'Avion Tout Electrique*. La puissance électrique embarquée ne cesse donc de croître. Toutefois, l'environnement avionique décrit précédemment impose une particularité à l'utilisation croissante de l'énergie électrique notamment en ce qui concerne le niveau de tension. Des études précédentes réalisées par [FLA09] ont en effet mis en évidence un abaissement considérable du niveau de tension d'apparition de décharges partielles dans de telles conditions expérimentales. L'impact de ces décharges, qui peut être particulièrement néfastes pour les systèmes d'isolation électrique des systèmes sera détaillé dans la suite du manuscrit.

I.5 Présentation du contexte industriel et scientifique

Une transformation révolutionnaire des technologies de l'énergie électrique des avions est donc en train de se produire, elle promet des avions de demain qui auront une fiabilité et une efficacité supérieures. L'accroissement de la fiabilité du matériel est bien sûr motivé par la volonté d'accroître la sécurité du transport aérien. Mais, il est également lié à la volonté de diminuer les coûts de fonctionnement et de maintenance des matériels utilisés à bord des aéronefs. L'aspect environnemental acquiert quant à lui une importance croissante car le transport aérien est aujourd'hui montré du doigt par les spécialistes du climat comme contribuant au dérèglement climatique mondial du fait de ses émissions importantes de gaz à effet de serre. A ce titre, les avionneurs font de réels efforts pour optimiser la consommation énergétique des aéronefs.

Pour répondre favorablement à cette conjonction d'évènements, l'industrie aéronautique souhaite aujourd'hui relever le défi technique et scientifique du concept d'avion tout-électrique. Or, ce passage vers « *les avions plus électrique* » nécessite l'augmentation de la puissance électrique embarquée. Cette augmentation peut être réalisée en augmentant soit le courant, soit la tension. Néanmoins, l'augmentation du courant induit une augmentation de la taille des câbles et donc du poids. Pour répondre à ces conséquences coûteuses dans un système embarqué, une solution est d'augmenter la tension alternative en passant d'un système 115V/200V à un système 230V/400V. Ainsi, pour une même puissance absorbée, les niveaux de courant dans les câbles seront moindres [EMA03]. Cette augmentation de tension entraîne une diminution du poids des câbles qui présente plusieurs avantages : tout d'abord, le gain de masse dans le câblage. En effet, en doublant la tension, la masse des câbles est divisée par deux. Le gain est appréciable, sachant que l'on trouve près de 100 kilomètres de câbles dans un 787 et plus de 500 kilomètres dans l'A380. Par ailleurs, les déperditions d'énergie dans les câbles sont réduites en raison de leur plus faible masse. Ensuite, la distribution est optimisée et il y a de ce fait moins de risques d'interruption de puissance.

Pour autant, les défis posés par l'utilisation de l'électronique de puissance ou de la haute tension ne manquent pas. Pour les matériaux isolants, l'augmentation du niveau de tension entraîne l'apparition des phénomènes défavorables aux *Systèmes d'Isolation Electrique* (SIE)

tels que les décharges partielles (DP). Tous les équipements électriques sont concernés ; quelle que soit la configuration du système d'isolation, tous sont assujettis aux phénomènes des DP si les conditions d'initiation sont réunies. Les décharges partielles et leurs effets sur les matériaux ont été un sujet de recherche depuis de longues années dans quelques laboratoires universitaires. Le contexte particulier de l'aéronautique lié à une montée en tension avec ses propres contraintes environnementales a suscité un nouvel intérêt d'une meilleure compréhension de ces phénomènes dans un premier temps et des conséquences sur les SIE dans un second temps.

I.6 La naissance d'un projet à caractère industriel

C'est dans ce contexte très motivant que s'inscrivent nos travaux de recherche.

L'avionneur européen Airbus, en collaboration avec plusieurs autres sociétés et sous-traitants, a initié le programme ISS Power, « *Innovative Solutions for Systems – Power* ». L'objectif principal de ce projet est de trouver des solutions aux différents problèmes qui accompagnent l'augmentation de la puissance électrique embarquée. Ce projet est divisé en plusieurs axes de recherche où, par exemple dans le domaine des matériaux, des études sont menées sur la fiabilité des condensateurs, sur les inductances et les filtres, sur les condensateurs céramiques haute permittivité et sur les DPs. Sur ce dernier point, deux sujets de recherche doctorale sont impliqués et sont principalement axés sur la maîtrise et l'optimisation des SIE vis à vis des DPs.

La première thèse a pour but de définir un nouvel indicateur de vieillissement des isolants utilisable sur les actionneurs électriques. Elle est réalisée au sein du LSEE (Laboratoire Systèmes Electriques et Environnement) de Béthune.

La deuxième thèse est celle dont fait l'objet le présent mémoire. Elle est réalisée au sein du LAPLACE de Toulouse. Elle sera divisée en deux parties :

La première partie sera la suite des travaux de thèse réalisés par [FLA09]. Rappelons qu'en réalisant des mesures de DP sur des dispositifs représentatifs des équipements embarqués dans les aéronefs, il a mis en évidence l'inévitable existence des phénomènes de DP dans l'hypothèse du doublement de tension exigée dans l'avion de demain. Il a ensuite démontré que le seuil d'apparition de ces décharges varie en fonction des paramètres atmosphériques, par des essais menés en utilisant deux électrodes sphériques. Dès lors une étude supplémentaire est envisagée pour étendre cette approche à d'autres configurations géométriques, deux électrodes sphériques n'étant pas une représentation universelle de toutes les éventualités rencontrées dans les configurations réelles. Cette étude a fait l'objectif de la première partie de nos travaux de thèse, et aborde les points suivants :

- D'autres configurations d'électrodes seront utilisées afin de pouvoir établir une cartographie complète des différentes situations géométriques des installations.
- Des mesures des caractéristiques électriques des décharges tels que leur seuil d'apparition et l'énergie dissipée, seront réalisées en contraintes combinées (P, T, Hr), afin de mieux comprendre les phénomènes physiques qui régissent le développement de ces décharges dans ces conditions.

Pour de simples raisons de sécurité et de bon fonctionnement, l'isolation électrique des systèmes est impérative. Les matériaux utilisés pour cette isolation fonctionnant dans un environnement aussi sévère que l'aéronautique subissent une modification plus ou moins importante de leurs propriétés physique et chimique, vieillissent et se dégradent au cours du temps à cause de l'existence des décharges électriques. Beaucoup d'études ont abordé les mécanismes de vieillissement des isolants vieillissant sous DP et sous conditions normales de température et de pression, mais peu d'entre elles ont exploité l'influence des conditions aéronautiques sur les mécanismes de vieillissement. En effet, les SIE sont soumis à une variation des paramètres atmosphériques selon l'endroit où ils seront installés. Par exemple, ces systèmes peuvent être installés en zone pressurisée (25°C, pression atmosphérique) ou être exposés à l'atmosphère extérieure où, dans les ailes de l'avion ou autour des moteurs, la température peut varier de -55°C à 40.000 pieds (environ 12.192 km) à 200°C à proximité des moteurs dans la nacelle [NEL07]. La pression ambiante est de 142 Torr à cette altitude. Dans ces conditions, l'objectif de la deuxième partie de nos travaux de thèse, est d'étudier l'impact de l'environnement aéronautique sur les propriétés d'une décharge à barrière diélectrique qui à leur tour influent sur les mécanismes de vieillissement des isolants sous DP.

CHAPITRE II. IMPACT DE L'ENVIRONNEMENT AERONAUTIQUE SUR LES DECHARGES DANS LES GAZ

Chapitre II Impact de l'environnement aéronautique sur les décharges dans les gaz

En premier lieu nous allons présenter dans ce chapitre un rappel théorique sur la phénoménologie d'une décharge électrique dans l'air. Nous en rappellerons les principaux paramètres physiques, les phénomènes mis en jeu ainsi que les lois qui les régissent.

Ce chapitre enchainera sur une description du dispositif expérimental utilisé pour la caractérisation de l'impact de l'environnement aéronautique sur les caractéristiques de la décharge.

Puis il sera consacré à la présentation et à la discussion des principaux résultats obtenus permettant la mise en évidence des effets de différents paramètres sur la courbe de Paschen ainsi que sur la nature des mécanismes régissant le développement des décharges dans cet environnement.

II.1 Décharges électriques dans les gaz : LE PLASMA

Les décharges électriques dans un gaz conduisant à la formation d'un plasma, nous commençons dans un premier temps par quelques rappels et généralités sur les plasmas. Nous rappellerons les différents paramètres et processus physiques qui interviennent au sein des plasmas et qui permettent ainsi de les classer.

II.1.1 Définition d'un plasma

Du point de vue scientifique la matière peut exister dans différents états physiques à savoir l'état solide, l'état liquide, gazeux ou vapeur et l'état de plasma.

Les plasmas sont le quatrième état de la matière et représentent près de 99 % de l'Univers. Ils existent soit à l'état naturel (couronne solaire, soleil, intérieur des étoiles, ionosphère, intérieur des naines blanches...), soit en laboratoire où ils sont généralement produits par des décharges électriques. Le terme de « plasma » (du grec « matière informe ») a été introduit la première fois en 1929 par les physiciens américains I. Langmuir et L. Tonks pour désigner dans les tubes à décharge [BRO66][NAS71][DEL63], certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre.

Ainsi, un plasma est défini comme un milieu composé d'électrons et d'ions, libres de se mouvoir dans toutes les directions de l'espace. C'est un milieu ionisé où la densité de particules chargées est suffisamment grande pour que le milieu reste macroscopiquement

neutre et considéré comme conducteur électrique.

Les plasmas constituent un vaste domaine de la physique qui a suscité un vif intérêt en vue d'application aussi bien dans l'industrie (torche à plasma, traitement de surface, gravure,...) que dans la vie quotidienne (téléviseur à écran plasma). Si dans ces applications les plasmas offrent une alternative intéressante à d'autres procédés, dans le cadre de notre étude, un plasma s'avère plutôt indésirable au voisinage du Système d'Isolation Electrique (*SIE*) du fait de sa nocivité [BIT04].

II.1.2 Production d'un plasma

On peut produire un plasma en portant un gaz à température suffisamment élevée ; Il faut cependant atteindre des températures très élevées, pour que les molécules puissent s'ioniser mutuellement lors de collisions. On peut également y parvenir en appliquant un champ électrique, et cela même à température ambiante. En effet, il y a toujours une certaine densité, même faible, d'électrons libres dans l'atmosphère et due à l'ionisation des molécules par des rayons cosmiques. Ce champ électrique a pour effet d'accélérer les électrons libres et leur conférer des énergies suffisantes pour qu'ils puissent, par collisions, ioniser les molécules. S'opère alors un phénomène d'avalanches électroniques qui peut, si le champ électrique est suffisamment élevé, conduire à une décharge électrique et à la formation d'un milieu conducteur, le plasma.

II.1.3 Paramètres physiques des plasmas

Selon leur forme et leur mode d'obtention, tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être classifiés en fonction de certains paramètres. Ces paramètres sont essentiellement [LAB02] :

- **Densité électronique** : la densité électronique n_e est le nombre d'électrons libres par unité de volume, généralement exprimée en cm^{-3} .
- **Taux d'ionisation** : le taux d'ionisation τ_i représente le rapport du nombre d'électrons libres n_e sur le nombre de particules totales $n_e + N$, où N est le nombre de particules neutres par unité de volume. Le taux d'ionisation est alors donné par :

$$\tau_i = \frac{n_e}{n_e + N} \quad \text{II.1}$$

On utilise également le rapport n_e/N qui traduit l'importance des collisions entre particules chargées par rapport aux collisions entre particules chargées et neutres.

- **Température électronique** : T_e est la température électronique qui correspond à la

température absolue en Kelvin (K) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique kT_e (en électron-volt eV) avec k la constante de Boltzmann ($k_B=1,381.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), sachant que $1\text{eV} \approx 1,4 \times 10^4 \text{ K}$.

- **Libre parcours moyen** (noté lpm par la suite): le libre parcours moyen λ correspond à la distance moyenne parcourue par une particule entre deux collisions. Il dépend de la vitesse des particules, ainsi que de la probabilité de collision.
- **Longueur de Debye** : la longueur de Debye λ_D définit la longueur à partir de laquelle le champ électrique Coulombien issue d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signe opposé dans le volume environnant. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_D = \left(\frac{2\varepsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e} \right)^{1/2} \quad \text{II.2}$$

avec ε_0 la permittivité du vide ($8,84 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) et e la charge élémentaire d'un électron ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Si un objet est introduit dans le plasma, la perturbation sur le champ électrique ne peut se produire que sur une distance de l'ordre de λ_D . Cette région non neutre s'appelle la gaine de Debye.

II.1.4 Notions élémentaires sur les plasmas

II.1.4.1 Collisions

La formation d'un plasma est due à un transfert d'énergie cinétique par collision entre un électron accéléré par un champ électrique et les molécules neutres du gaz. Les collisions entre deux particules sont de deux types :

- Les collisions élastiques qui ne modifient pas l'énergie interne de ces particules qui sont simplement déviées de leur trajectoire originale.
- Les collisions inélastiques qui s'accompagnent d'un échange d'énergie (ionisation, excitation,...) d'une particule, et qui interviennent plus particulièrement dans la formation et le développement d'un plasma.

Ces collisions peuvent se grouper en deux grandes familles: les collisions électroniques et les collisions entre particules lourdes. Ces collisions sont regroupées dans le Tableau II.1.

Processus	Réactions
Ionisation par impact électronique	$e^- + A \rightarrow 2e^- + A^+$
Excitation par impact électronique	$e^- + A \rightarrow e^- + A^*$
Recombinaison radiative	$e^- + A^+ \rightarrow A^* + h\nu$
Recombinaison à trois corps	$e^- + A^+ + B \rightarrow B + A^*$
Détachement par impact électronique	$e^- + A^- \rightarrow 2e^- + A$
Attachement à trois corps	$e^- + A + B \rightarrow B^- + A$
Ionisation dissociative	$e^- + AB \rightarrow 2e^- + A + B^+$
Dissociation par impact électronique	$e^- + AB \rightarrow e^- + A + B$

Tableau II.1 Principaux types de collisions dans un plasma

II.1.4.2 Sections efficaces de collisions et libre parcours moyen

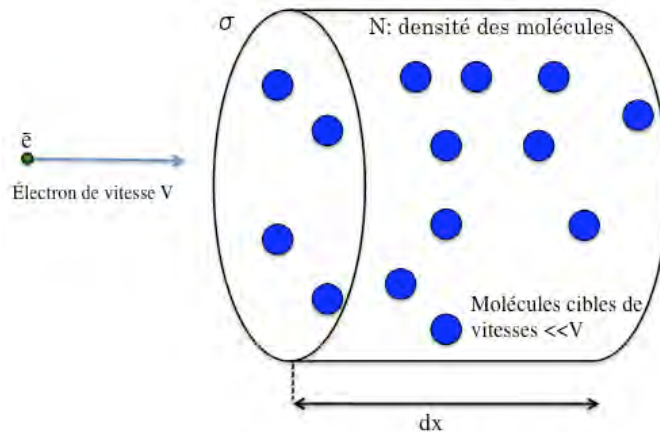


Figure II.1 Volume d'interaction et Section efficace

Soit un électron « \bar{e} » se déplaçant à une vitesse V vers un volume « σdx » contenant une densité N de particules. Le nombre de collisions « n_c » effectué par l'électron une fois en interaction avec ces particules est proportionnel à la distance parcourue par cet électron « dx », à la densité de molécules « N » et à un coefficient « σ » :

$$n_c = N \sigma dx \quad \text{II.3}$$

Le coefficient σ , homogène à une surface est la **section efficace de collisions**. σ dépend de la vitesse relative entre l'électron et la molécule.

Le libre parcours moyen est obtenu en divisant la distance parcourue « dx » par le nombre de collisions sur « dx » [AGU90] :

$$\lambda = \frac{dx}{N\sigma dx} = \frac{1}{N\sigma} \quad \text{II.4}$$

On voit ainsi que le libre parcours moyen des particules chargées lors de collisions avec les neutres est inversement proportionnel à la densité de gaz, elle-même déduite de la loi des gaz parfait :

$$P = Nk_B T \quad \text{II.5}$$

alors :

$$N = \frac{P}{k_B T} = 9,654 \cdot 10^{18} \frac{P(\text{torr})}{T(K)} \text{cm}^{-3} \quad \text{II.6}$$

La section efficace de collisions dépend de plusieurs paramètres dont l'énergie de la particule incidente et le champ électrique appliqué; pour le calcul du *lpm* des électrons, nous avons considéré une valeur de 10^{-16} - 10^{-15} cm^2 , ordre de grandeur généralement utilisé dans le cas des collisions électrons-neutre.

Le tableau II.2 donne quelques ordres de grandeur de la densité N (calculée d'après l'équation (II.6)), du libre parcours moyen d'un électron (calculé d'après l'équation (II.4)) et de la section efficace de collision d'un électron avec une particule neutre pour deux valeurs de pression.

Pression (torr)	760	0,76
$N (\text{cm}^{-3})$	$2,45 \cdot 10^{19}$	$2,45 \cdot 10^{16}$
$\sigma (\text{cm}^{-2})$	10^{-16}	10^{-16}
Lpm	$1 \mu\text{m}$	1mm

Tableau II.2 Valeurs du lpm en fonction de la pression.

En tenant compte de la liaison entre la densité des particules et la température (II.6), il apparait que si λ_0 correspond au *lpm* à la pression p_0 (760Torr) et à la température T_0 (298K), et λ au *lpm* à la pression p et à la température T , on peut alors écrire :

$$\lambda = \lambda_0 * \frac{p_0}{p} * \frac{T}{T_0} \quad \text{II.7}$$

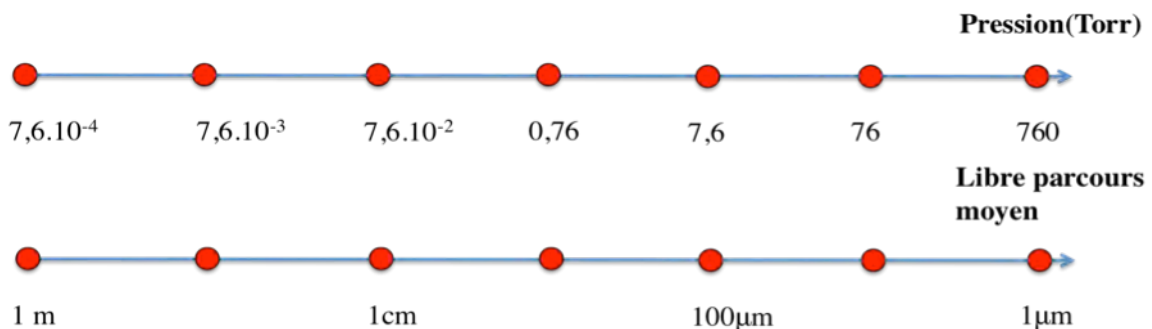


Figure II.2 Variation du *lpm* des électrons à température ambiante et en fonction de la pression déduite de l'équation (II.4).

La Figure II.2 qui donne l'ordre de grandeur du lpm d'un électron en fonction de la pression et à température ambiante, peut s'expliquer par le fait que, plus la densité des molécules est grande, plus il y aura de chances que celles-ci se percutent, de sorte que le lpm s'en trouvera réduit.

Dans un environnement avionique, le lpm pourra varier en fonction des conditions atmosphériques, de pression et de température ; il apparaît ainsi par exemple qu'une augmentation de température est "équivalente" à une réduction de pression (équation (II.7)).

II.1.5 Processus physiques et mécanismes de formation des décharges électriques

Considérons deux électrodes planes et parallèles plongées dans un gaz. Lorsqu'on applique une tension, un électron libre présent entre ces deux électrodes est accéléré sous l'effet du champ électrique (Figure II.3a). Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons (Figure II.3b). Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collisions au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive), à la création d'une avalanche électronique (Figure II.3c). Schématiquement ceci pour être représenté par la figure suivante :

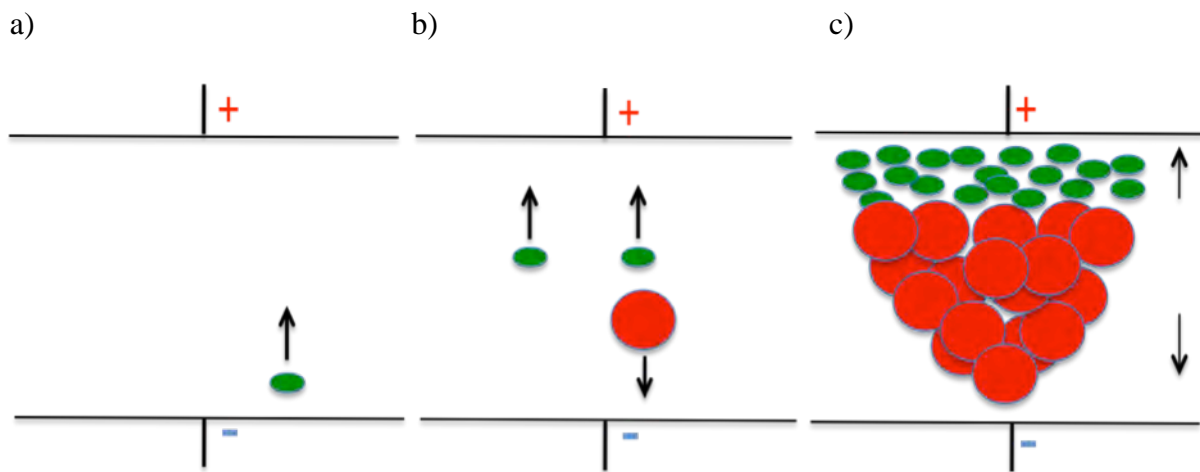


Figure II.3 Processus d'avalanche électronique : a) accélération de l'électron, b) ionisation par collision, c) avalanche électronique

Pour qu'un courant de décharge puisse se maintenir, il faut que ce mécanisme d'avalanche puisse perdurer. Pour cela, il est nécessaire qu'à la suite d'une avalanche des électrons secondaires soient créés au voisinage de la cathode pour en déclencher une nouvelle. Il existe plusieurs mécanismes pour régénérer des électrons, dits électrons secondaires, à la surface de la cathode. Le mécanisme le plus important est en général la production d'électrons secondaires par impact ionique : les ions positifs accélérés par le champ électrique, viennent

heurter la cathode qui émet alors des électrons. Ces électrons secondaires sont à l'origine de nouvelles avalanches secondaires et provoquent le claquage de l'air.

Sous l'influence du champ électrique appliqué, les particules ainsi créées vont se déplacer dans l'espace interelectrodes et générer un courant électrique. Du point de vue électrique, la Figure II.4 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée [POI98]. La courbe permet de distinguer quatre régimes :

Décharge non autonome : Ce régime se traduit par le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas au critère d'auto entretien de la décharge. Dans cette région des phénomènes d'ionisations extérieurs sont nécessaires pour assurer le passage d'un courant dans le gaz. Elle est caractérisée par l'absence de tout phénomène lumineux et une intensité du courant de l'ordre de 10^{-10} A.

Décharge autonome : Dans cette région l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisations extérieurs. La décharge est dite auto entretenue et cet entretien est assuré d'une part par l'ionisation en volume (multiplication électronique) et d'autre part par la génération continue d'électrons à la cathode par émission secondaire due au bombardement ionique, ou par émission thermoïonique due au chauffage de la cathode par une source extérieure ou par la décharge elle-même.

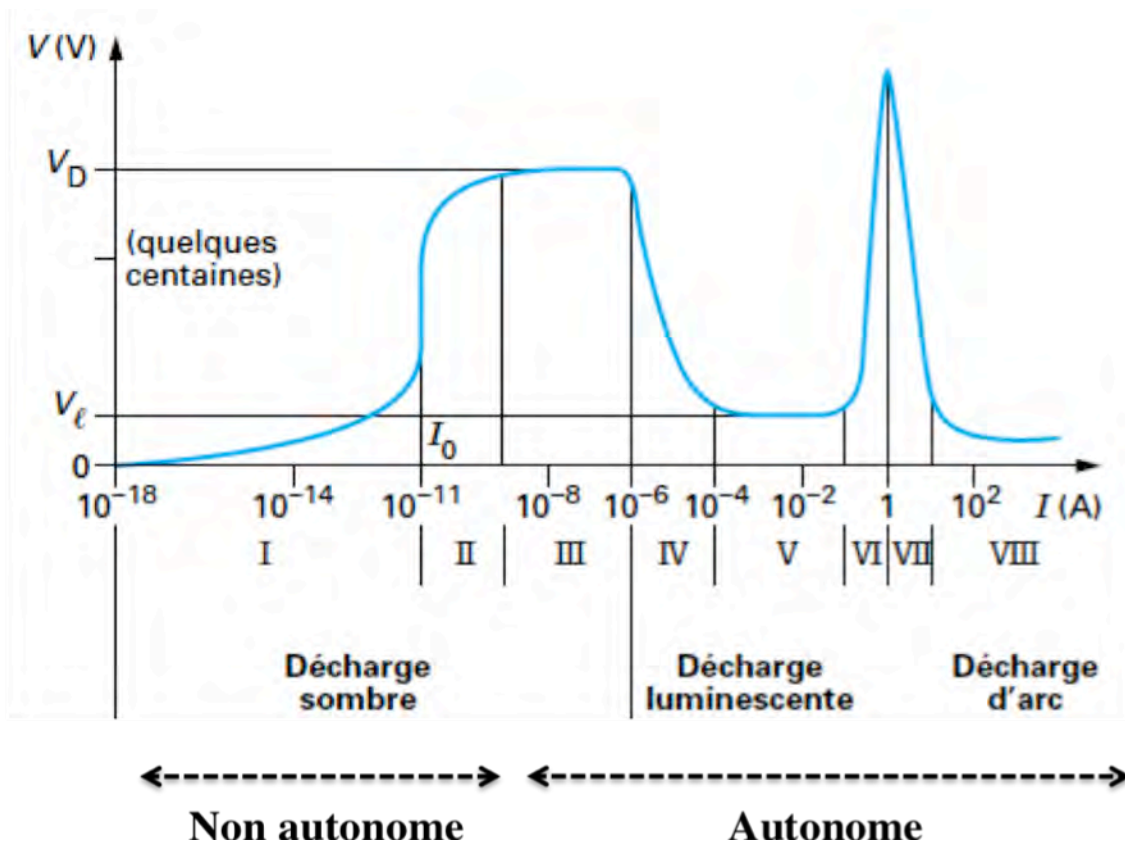


Figure II.4 Caractéristique courant tension et différents régimes de décharges [POI98]

Décharge de Townsend : Ce régime est caractérisé par un courant très faible (10^{-8} A). La densité de particules chargées ne modifie pas de façon importante le champ géométrique, on doit simplement parler de milieu ionisé. La décharge est peu lumineuse et ce régime est quelques fois appelé « décharge sombre ». Ce régime correspondant à la région III est caractérisé par une tension V_D appelée "potentiel disruptif".

Décharge lumineuse : Lorsque le courant d'une décharge de Townsend croît, la densité des ions sera importante et le champ géométrique sera distordu par la charge d'espace induite. Un plasma quasi neutre se forme. La tension de fonctionnement est plus faible car la redistribution du champ due à la charge d'espace conduit à une multiplication plus efficace qu'en champ uniforme. Elle se distingue en aval par la décharge lumineuse subnormale (région IV), un palier de décharge lumineuse normale (région V) et en amont par la décharge lumineuse anormale (région VI). Cette décharge est très lumineuse et s'étend entre 10^{-6} A et 1 A [JEA05].

Décharge d'arc : L'amorçage de la décharge d'arc s'effectue après une zone de transition (région VII), où la tension cesse de croître et où des effets thermiques importants au niveau de la cathode commencent à apparaître. En effet, la densité d'ions frappant la cathode devient suffisamment grande pour que la température de la cathode, chauffée par le bombardement des ions soit assez élevée pour qu'un effet thermoïonique entre en jeu. Ce régime de décharge est caractérisé par un fort courant (> 100 A), une faible tension (< 100 V) et une émission lumineuse très intense (région VIII).

II.1.6 Loi de Paschen : Rappel théorique

Nous rappelons dans cette partie les bases théoriques nécessaires à notre étude. Pour déterminer la tension d'initiation d'une décharge, une description simple des phénomènes physiques mis en jeu conduit à la loi de Paschen utilisée comme approximation théorique [POP68] [PAP63] [MEE77]. Ensuite, nous allons présenter les facteurs qui influent sur cette loi ainsi que son domaine de validité.

II.1.6.1 Etablissement de la Loi de Paschen

Pour décrire une décharge électrique dans les conditions de Townsend, il est nécessaire d'introduire deux coefficients : le premier coefficient de Townsend α traduisant l'effet d'avalanche et le deuxième coefficient de Townsend γ traduisant l'émission secondaire d'électrons à la cathode.

II.1.6.1.1 Premier coefficient de Townsend, définition

Le premier coefficient de Townsend α peut être défini par la quantité d'électrons dn créés au cours d'une avalanche électronique par une quantité n d'électrons se déplaçant sur une longueur dx , soit:

$$dn = \alpha n dx \text{ ou } n = \exp(\alpha x) \quad \text{II.8}$$

Le coefficient α décrit le processus d'avalanche caractérisée par les ionisations successives et la création d'électrons. Dans l'expression (II.8), si un électron est créé par un seul électron originel, c'est que ce dernier a parcouru une distance égale au *lpm* (λ). On retrouve donc [DAV06] :

$$\alpha = 1/\lambda \quad \text{II.9}$$

Alors, un électron libéré à la cathode (ayant une énergie suffisante pour ioniser les molécules) se traduit par l'arrivée de e^{ad} électrons au niveau de l'anode, créant ainsi une avalanche électronique, et simultanément des $(e^{ad} - 1)$ ions au niveau de la cathode.

II.1.6.1.2 Premier coefficient de Townsend, lien avec la pression et le claquage

Deux hypothèses permettent de trouver une expression simple pour α . Ces hypothèses bien que très fortes, permettent d'avoir une expression de α très proche de la valeur calculée rigoureusement [NAS71] :

1. L'électron ionisant démarre entre deux collisions avec une vitesse dont la composante dans la direction du champ est nulle. Cela signifie qu'il perd toute son énergie cinétique gagnée grâce au champ électrique, au profit de l'atome ou de la molécule à chaque collision.
2. La probabilité d'ionisation par collision vaut 1 tant que l'énergie cinétique de l'électron est supérieure ou égale à l'énergie d'ionisation de l'atome.

Selon ces deux hypothèses, un électron va ioniser un atome au cours d'une collision quand son énergie cinétique, gagnée pendant son parcours libre, est égale à l'énergie d'ionisation eV_i de l'atome. Si λ_i est le parcours libre de l'électron dans la direction du champ électrique alors,

$$eE\lambda_i \geq eV_i \quad \text{II.10}$$

où E est la valeur du champ électrique uniforme, qui ne varie pas pendant le temps et e est la charge de l'électron. Ce qui conduit à :

$$E\lambda_i \geq V_i \quad \text{II.11}$$

Le libre parcours minimal qui donne naissance à une ionisation selon les hypothèses précédentes est donc :

$$\lambda_i = \frac{V_i}{E} \quad \text{II.12}$$

La probabilité qu'un libre parcours soit supérieur ou égal à λ_i est déterminée par la fonction de distribution des libres parcours ; dans ces conditions le nombre de libres parcours n , parcourus par une particule par unité de longueur, supérieurs ou égaux à λ_i , est donné par :

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{\lambda_i}{\lambda_m}\right) \quad \text{II.13}$$

n_0 est le nombre total de libres parcours, parcourus par cette particule par unité de longueur, et λ_m est le libre parcours moyen (soit $n_0 \lambda_m = 1$). La probabilité pour qu'un libre parcours soit supérieur à λ_i est donc :

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(-\frac{\lambda_i}{\lambda_m}\right) \quad \text{II.14}$$

n représentant le nombre de libres parcours parcourus par une particule par unité de longueur et à l'origine d'une ionisation, c'est donc également le nombre d'électrons créés par avalanche par unité de longueur, ce qui correspond à la définition du premier coefficient de Townsend. On peut donc écrire :

$$\alpha = n_0 \exp\left(-\frac{\lambda_i}{\lambda_m}\right) \quad \text{II.15}$$

$$\text{soit } \alpha = \frac{1}{\lambda_m} \exp\left(-\frac{\lambda_i}{\lambda_m}\right) \quad \text{II.16}$$

Or, il a été démontré que λ_m est proportionnel à T/p [NAS71]. Donc $1/\lambda_m = Ap$ où A est une constante qui dépend de la température T . En substituant cette valeur et celle de λ_i , d'après l'équation (II.12) il arrive :

$$\alpha = Ap \exp\left(-\frac{ApV_i}{E}\right) = Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad \text{II.17}$$

où $B=AV_i$ alors l'équation (II.17) s'écrit :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad \text{II.18}$$

II.1.6.1.3 Deuxième coefficient de Townsend

Les ions étant aussi soumis à l'action du champ électrique, ils sont accélérés et viennent bombarder la cathode. L'émission d'électrons à la cathode, dite "émission secondaire" correspond au deuxième coefficient de Townsend (γ) qui est le nombre d'électrons secondaires émis par ions incidents. Ce coefficient dépend de la densité du gaz, de l'énergie acquise par les ions, autrement dit du champ réduit, mais également de la nature des électrodes. Il y a donc $\gamma(e^{\alpha d}-1)$ électrons secondaires créés par bombardement ionique à la cathode.

Les mécanismes d'ionisation et d'émission secondaire entretiennent la décharge ; elle est auto-entretenu ou autonome, lorsque la condition de claquage de Townsend définie par la relation [LOE71] :

$$\gamma(e^{\alpha d}-1)=1 \text{ avec } e^{\alpha d} \gg 1 \quad \text{II.19}$$

est remplie.

La relation (II.19) traduit le fait que chaque électron présent à la cathode est un électron issu de l'émission secondaire, la création d'électrons ne nécessite donc plus d'agent extérieur.

L'équation (II.19) peut s'écrire sous la forme :

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad \text{II.20}$$

α/p étant une fonction de E/p , cette relation devient :

$$\alpha d = A p d e^{-\frac{B}{E/p}} = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad \text{II.21}$$

II.1.6.1.4 La loi de Paschen

Dans le cas d'un champ électrique uniforme ($E=V/d$) et d'un potentiel satisfaisant l'équation de Laplace ($\nabla^2 \Phi = 0$), on peut déduire des équations précédentes une relation qui lie la valeur de la tension de claquage à la pression du gaz et à la distance interélectrodes pour obtenir la relation connue et dite « la loi de Paschen ». Cette loi [PAS89] indique que la tension d'apparition d'un arc électrique dans un gaz est une fonction non linéaire du produit pd (pression x distance) :

$$V_B = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)} \text{ avec } C = \ln\left(\frac{A}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right) \quad \text{II.22}$$

A et B sont déterminés expérimentalement, pour chaque gaz et sont considérés constants sur un domaine de champ réduit E/p .

Gaz	A (Torr ⁻¹ .cm ⁻¹)	B (V.Torr ⁻¹ .cm ⁻¹)	Domaine de validité de E/p (V.Torr ⁻¹ .cm ⁻¹)
H ₂	5	130	150-600
N ₂	12	342	100-600
CO ₂	20	466	500-1000
Air	15	365	100-800
H ₂ O	13	290	150-1000
HCl	25	380	200-1000
He	3	34	20-150
Ne	4	100	100-400
Ar	14	180	100-600
Kr	17	240	100-1000
Xe	26	350	200-800
Hg	20	370	200-600

Tableau II.3 Valeurs des constantes A et B pour divers gaz [POP68]

L'équation (II.22) présente l'expression de la tension de claquage, et la courbe $V=F(pd)$ tracée dans les conditions normales de température et de pression ($T= 20^{\circ}\text{C}$, $p = 760\text{Torr}$, $H_a = 11\text{g/m}^3$) est appelée courbe de Paschen. Dans notre cas on a considéré une valeur de coefficient secondaire de Townsend qui est de l'ordre de 10^{-2} , **qui tient compte de la nature des électrodes utilisées.**

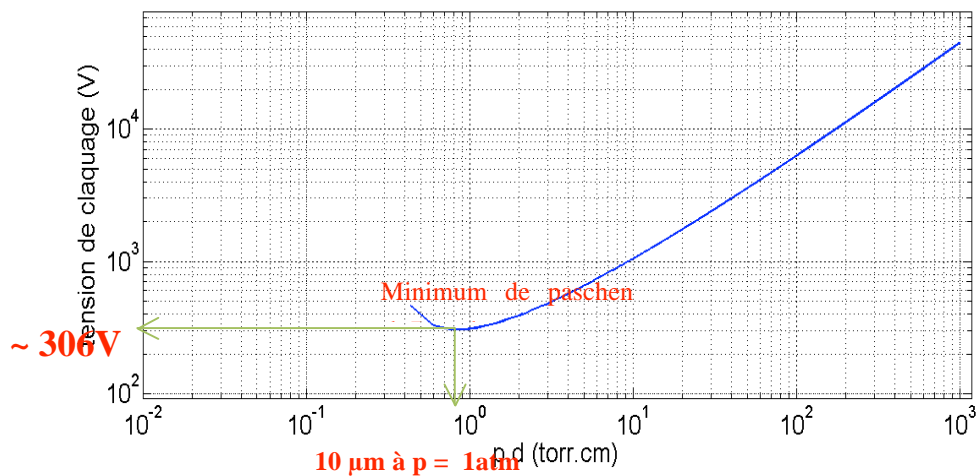


Figure II.5 Courbe de Paschen dans les conditions normales de température et de pression

L'existence d'un minimum sur la courbe s'explique intuitivement en partant de la constatation que le produit pd est proportionnel au nombre d'atomes ou de molécules se trouvant entre les électrodes. Ainsi, à très basse pression, étant donné le nombre limité de particules présentes, l'avalanche ionisante est limitée, ce qui entraîne une tension disruptive élevée. Pour les pressions élevées, la forte densité moléculaire fait que le libre parcours moyen des particules ionisantes n'est plus suffisant pour déclencher facilement le phénomène d'avalanche.

On peut également préciser que le minimum de Paschen correspond à une tension à peine supérieure à 300V pour une distance interélectrodes de 10 μ m à la pression atmosphérique. Jusqu'à présent, compte tenu des niveaux de tension utilisés actuellement (115VAC), on peut donc considérer que les SIE dans l'avionique sont exempts de décharges partielles, mais que ce niveau de tension est tout à fait compatible avec celui envisagé dans les systèmes électriques embarqués dans l'avionique.

De plus, on remarque que cette distance de 10 μ m est dans l'ordre de grandeur de la taille d'un défaut dans un SIE.

II.1.6.2 Influence du gaz et des électrodes sur la courbe de Paschen

La Figure II.6 et la Figure II.7 montrent l'influence du coefficient d'émission secondaire sur la courbe de Paschen. Si ces courbes ont sensiblement la même allure, les minima de la tension d'amorçage dépendent de la nature des électrodes, de leur état de surface (Figure II.6) et de la nature du gaz (Figure II.7) [ZHA02]. Plus précisément, on peut voir que plus la pression diminue plus la valeur de la tension de claquage devient dépendante de la nature de la cathode par son coefficient d'émission secondaire γ . En effet, si l'émission secondaire est élevée, une faible tension est nécessaire pour entretenir la décharge.

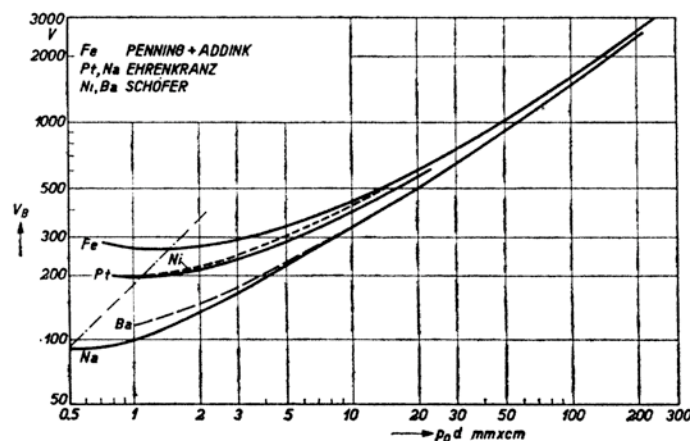


Figure II.6 Variation de la courbe de Paschen en fonction de la nature de la cathode [DRU40].

En complément, la Figure II.7 montre la variation du champ d'amorçage avec la distance interélectrodes pour quelques gaz rencontrés dans des applications industrielles.

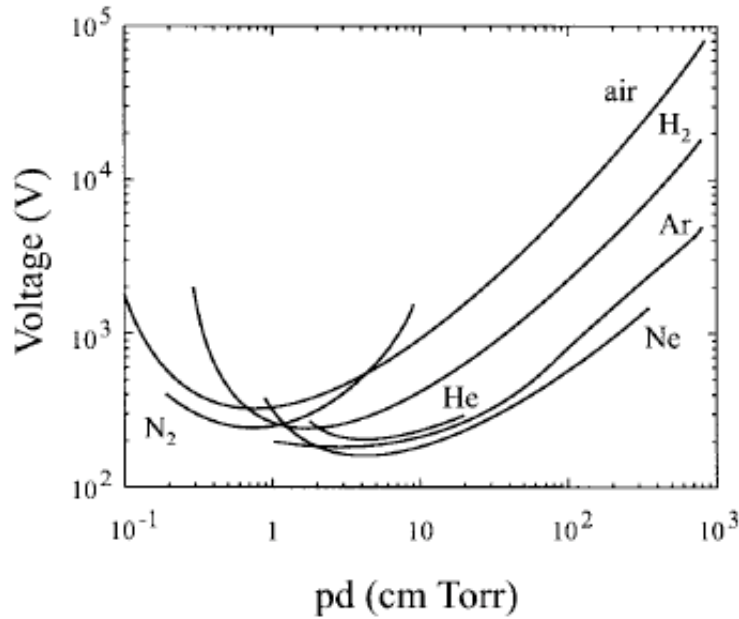


Figure II.7 Courbe de Paschen dans divers gaz [PAP63]

II.1.6.3 Variation des conditions environnementales

La théorie exposée précédemment et conduisant aux courbes de Paschen est établie dans des conditions normales de température, la variable environnementale étant uniquement la pression. Or les contraintes de l'environnement aéronautique imposent une variation de ces deux paramètres liés à l'altitude et à l'ambiance de fonctionnement. Un système électrique installé dans des zones non pressurisées est soumis à des variations de pression allant de la pression atmosphérique à 76 Torr (100 mbar) ainsi qu'à des températures élevées à proximité des réacteurs.

Pour prendre en compte des éventuels écarts à la condition de Paschen, des expressions correctives sont établies dans la littérature [ALL07] [DUN72] [MIK08] [ORT07] [PEE24]. Ces auteurs ont établi des expressions correctives liées à la variation de la température et du taux d'humidité. Ces corrections sont fondées sur la variation de la densité δ de l'air déduite de la loi des gaz parfaits.

Ces corrections peuvent s'énoncer de la manière suivante:

Correction de Peek :

Un facteur de correction δ est introduit pour tenir compte de la variation de la pression et de la température sur la tension de claquage. Rappelons que ce facteur multiplicatif est défini comme une image de la densité de l'air par [ALL07] [MIK08] [ORT07] [PEE24] :

$$V(p, T, Hr) = \delta * V(p_0, T_0, Hr_0) \quad \text{II.23}$$

avec

$$\delta = \frac{293}{T} \times \frac{p}{760} \quad \text{II.24}$$

Ce facteur correctif conduit à une proportionnalité de la tension d'amorçage à l'inverse de la température, ce qui se traduit par une translation vers le bas de la courbe de Paschen si la température augmente et réciproquement.

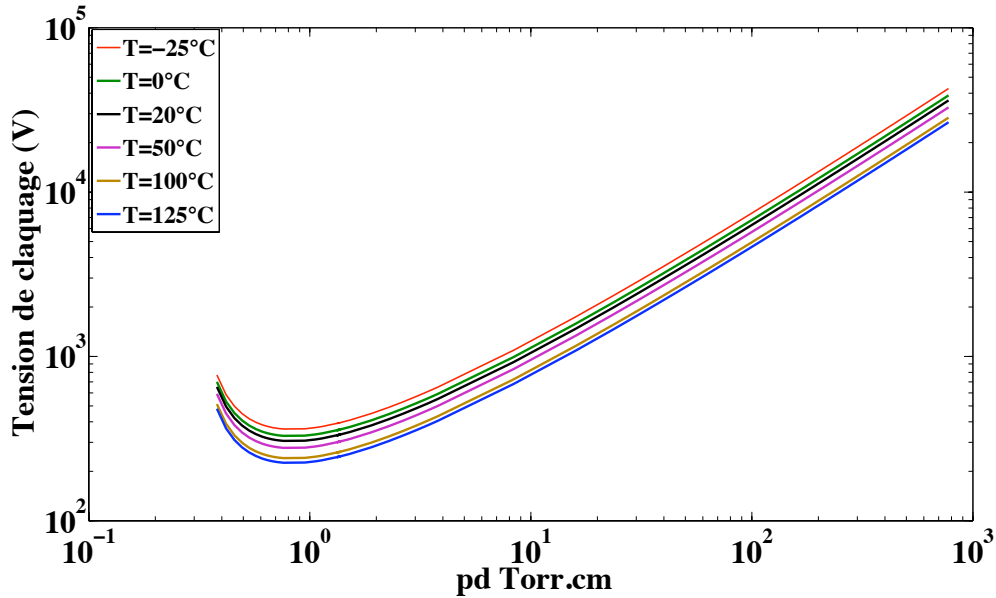


Figure II.8 Courbes calculées de Paschen corrigées par l'expression (II.23)

Correction de Dunbar

La correction de Dunbar [DUN72] est déduite de la loi des gaz parfaits ($PV = nRT$) qui indique que, à volume constant, la pression varie proportionnellement à la température. Ainsi, si (P_0, T_0) correspondent à un état donné d'un gaz, la pression équivalente qui règnerait dans ce milieu à température T peut être calculée par:

$$p = p_0 \frac{273 + T}{273 + T_0} \quad \text{II.25}$$

Les températures étant exprimées en °C.

La valeur de la pression ainsi calculée pour une température donnée est ensuite introduite dans l'expression de la tension de claquage de Paschen (II.22). Ainsi corrigées, les courbes de Paschen prennent l'allure des courbes représentées sur la Figure II.9.

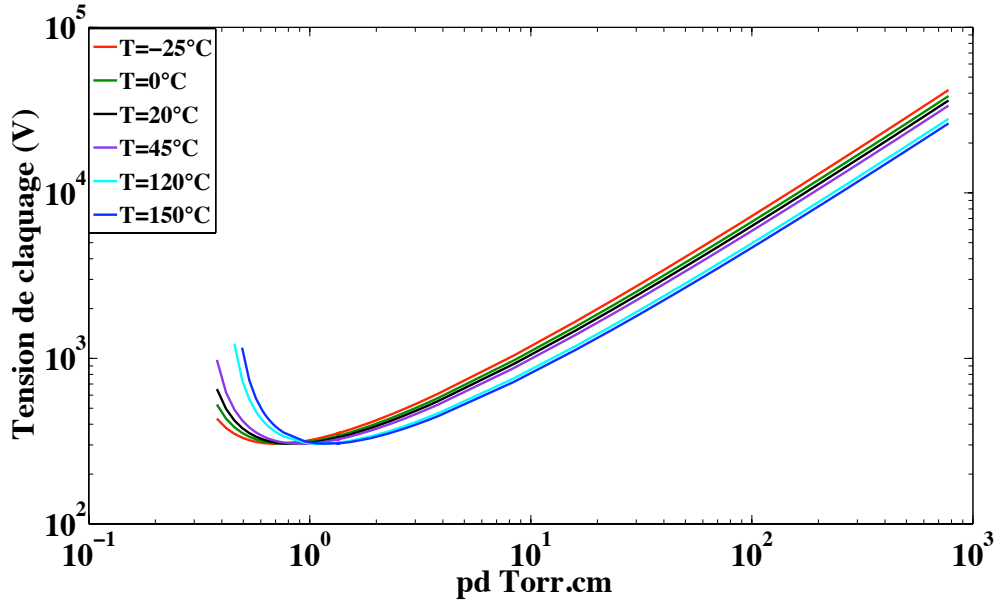


Figure II.9 Courbes calculées de Paschen corrigées par l'expression (II.25)

On observe que, fort logiquement, la valeur minimale de la tension d'initiation des décharges reste inchangée quel que soit le produit pd [KIR06], et qu'une montée en température introduit un glissement de ces courbes vers la droite.

Ces deux corrections, de Peek et de Dunbar, faisant référence dans le contexte applicatif de l'avionique, la validité de ces deux corrections sera vérifiée expérimentalement dans la deuxième partie de ce chapitre.

Correction en fonction de l'humidité :

Pour prendre en compte l'humidité de l'air, la tension disruptive peut être calculée en fonction de l'humidité par l'expression suivante [ALL86]:

$$V_h = V_{CNTP} \left(1 + \frac{K_h}{100} (h - h_{CNTP}) \right) \quad \text{II.26}$$

où V_h et V_{CNTP} sont les tensions correspondant respectivement à une humidité donnée « h » et à l'humidité absolue standard (11g/m^3) donnée par IEC [IEC70], et K_h est un coefficient relatif à l'humidité.

IEC suggère que K_h dépend de la distance interelectrodes en posant $K_h = K^w$, où K est un coefficient qui varie linéairement avec h et w est un exposant qui varie avec le gap.

Pour une humidité variant entre 5 et 20 ($5 < h < 20\text{g/m}^3$):

$$K = 1 + \frac{h - h_{CNTP}}{100} \quad \text{II.27}$$

$$\text{et} \\ K_h = \left(1 + \frac{h - h_{CNTP}}{100}\right)^W \quad \text{II.28}$$

Cependant, toujours d'après IEC, K_h sera indépendante de la distance interélectrodes pour un gap inférieur à 1m, et W devient ainsi égal à 1. Par conséquent l'expression de K_h devient :

$$K_h = \left(1 + \frac{h - h_{CNTP}}{100}\right) \quad \text{II.29}$$

Cette expression sera introduite dans l'équation (II.26) pour le calcul de la tension correspondante.

Là encore, la validité de cette correction, sera vérifiée expérimentalement dans le chapitre IV.

II.1.7 Notion du champ disruptif

Certains matériaux isolants peuvent, sous l'action d'un potentiel électrique, voir leurs propriétés physiques modifiées de façon réversible, et parfois irréversible. Le champ électrique correspondant au potentiel électrique maximal admissible avant claquage est appelé champ disruptif.

Le champ disruptif des matériaux isolants est bien supérieur à celui de l'air qui est de l'ordre de 3,6 kV/mm [MEE77] dans les conditions normales (20°C, 11g/m³ d'humidité et à pression atmosphérique). De plus la permittivité du gaz étant très inférieure à celle d'un matériau isolant, alors le champ électrique qui apparait dans une cavité gazeuse dans le volume ou en surface du matériau, est beaucoup plus important, que celui existant dans le volume de l'isolant. Pour ces deux raisons, les claquages, s'ils apparaissent, prennent d'abord naissance dans les cavités gazeuses.

II.1.7.1 Champ électrique réduit

Dans les équations de transport, le terme de gain de quantité de mouvement des particules chargées est proportionnel au champ électrique, tandis que le terme de perte de quantité de mouvement est proportionnel à la fréquence de collisions avec les neutres, donc à la densité de neutres N . Ceci signifie que le paramètre qui caractérise le bilan de quantité de mouvement (ou d'énergie) des particules chargées n'est pas seulement le champ électrique E , mais le rapport E/N (champ électrique réduit), ou E/p . En d'autres termes, pour avoir les mêmes effets qu'à une pression donnée (par exemple la même énergie moyenne électronique) il faut un champ plus grand si la pression (ou la densité) est plus grande (car les particules chargées

perdent plus d'énergie par collisions). La Figure II.10 représente le champ électrique réduit E/p déduit de la loi Paschen. Cette courbe délimite deux zones qui définissent le critère de fiabilité relatif à l'initiation de décharges électriques [COT07]. Selon le dimensionnement du système et les critères de fonctionnement (niveau de tension, géométrie des électrodes et environnement du système), pour une valeur de champ réduit se situant dans la zone 2, le système est exempt de décharges et la zone 2 peut être qualifiée de zone de fiabilité. Par contre, les valeurs de champ réduit de la zone 1 vont engendrer des décharges.

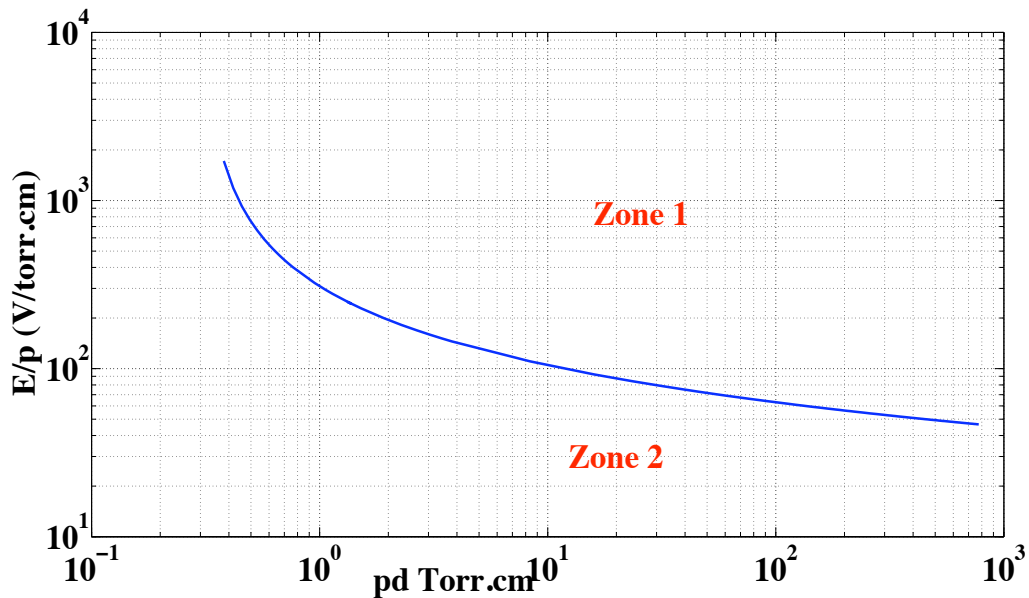


Figure II.10 Champ électrique réduit de Paschen

II.1.7.2 Influence de la géométrie des électrodes

La géométrie des électrodes définit la répartition du champ. Jusqu'ici, nous avons présenté le développement de la décharge en champ électrique homogène, obtenu avec des électrodes souvent planes, ayant des géométries régulières sans points anguleux et symétriques [HAR77] [HUS80].

Or pour représenter toutes les éventualités rencontrées dans les configurations réelles, nous avons eu recours à d'autres configurations d'électrodes caractérisées par un champ électrique non uniforme. Le passage au champ non homogène peut être considéré comme un changement continu de la distribution du champ et donc des paramètres physiques de la décharge. Des modèles du champ non homogène peuvent être issus par exemple de la représentation d'un condensateur cylindrique (Figure II.11a) représentatif des câbles de transport d'énergie, d'une configuration fil plan (Figure II.11b) ou pointe plan (Figure II.11c) représentatif d'un câble passant à côté d'un plan de masse.

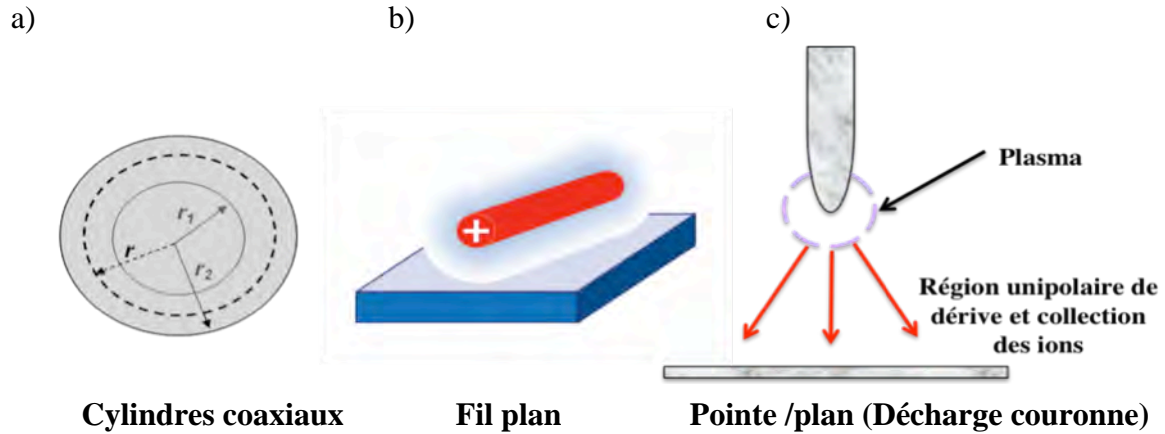


Figure II.11 Schématisation de la dissymétrie des électrodes

II.1.8 Energie des décharges

Une décharge unique et impulsionnelle ne dépose qu'une quantité infime d'énergie, mais les décharges peuvent être nombreuses et dans ce cas leur effet cumulatif peut conduire à la détérioration du matériau, d'où l'intérêt de considérer les énergies cumulées au cours des décharges comme des "ennemies" silencieuses.

Pour mesurer ces énergies, considérons le circuit électrique représenté sur la Figure II.12, dans lequel figure la source de tension appliquée à un dispositif sous test associé en série avec un condensateur de mesure:

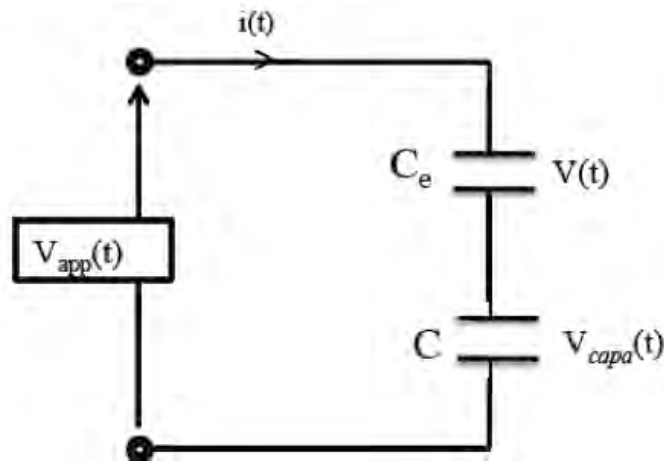


Figure II.12 Circuit électrique : C_e : capacité équivalente des deux électrodes ; C : capacité de mesure

La puissance instantanée de la décharge est donnée par :

$$p(t) = v(t) * i(t) = v(t) * \frac{dq}{dt} \quad \text{II.30}$$

avec $v(t)$ et $i(t)$ respectivement la tension et le courant de la décharge générée entre deux électrodes (représentée par son condensateur équivalent C_e), et q la charge électrique. Soit C le condensateur en série avec la décharge, alors:

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dv_{capa}}{dt} \quad \text{II.31}$$

La tension aux bornes du condensateur V_{capa} est très faible devant la tension appliquée aux bornes de la cellule car la capacité de la cellule (quelques pF) est faible par rapport à celle utilisée pour la mesure (nF). On peut donc considérer que:

$$v(t) = v_{app}(t) - v_{capa}(t) = v_{app}(t) \quad \text{II.32}$$

La puissance instantanée est donc donnée par :

$$p(t) = v_{app}(t) * C \frac{dv_{capa}}{dt} \quad \text{II.33}$$

La puissance active, définie par la valeur moyenne de la puissance instantanée est donc :

$$P = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt = f \int_T v_{app}(t) dq \quad \text{II.34}$$

et l'énergie consommée par période est :

$$E = P * T = \int_T v_{app}(t) dq \quad \text{II.35}$$

Deux méthodes largement commentées dans la littérature se présentent alors pour le calcul de l'énergie:

- Cette intégrale correspond à la surface encerclée par la figure de Lissajous (v_{app} , q). Manley [FAL97] a utilisé la courbe (v_{app} , q) pour en déduire l'énergie. L'aire de cette surface est donc l'énergie consommée par période. Puisque ces décharges sont alternées (positive et négative) durant la période, cette quantité d'énergie est donc la somme de l'énergie consommée pendant ces deux alternances.
- Si les décharges sont discrètes et dénombrables, l'équation (II.35) devient:

$$E_T = \sum_1^n V_i Q_i \quad \text{II.36}$$

Q_i et V_i étant respectivement la charge apparente de la décharge i et la valeur instantanée de la tension appliquée, et n est le nombre de décharges pendant une période T .

Dans notre étude, nous utilisons la figure de Lissajous pour le calcul de l'énergie dissipée, vu que cette méthode est plus précise que la deuxième qui nécessite la connaissance du nombre de décharges, qui n'est pas mesurable par notre dispositif expérimental.

II.1.9 Conclusion

Nous avons énoncé les notions de base de la physique des plasmas en vue de leur application aux décharges électriques. Nous avons en particulier présenté les fondements théoriques permettant de déboucher sur la loi de Paschen et rappelé les expressions correctives apportées à cette loi.

Jusqu'à très récemment, ce phénomène n'était pas pris en compte dans les spécifications relatives aux équipements électriques de l'avionique, compte tenu des faibles niveaux de tension utilisés qui était de l'ordre de 115V donc inférieure au minimum de Paschen. Or, l'augmentation du niveau de tension (230V AC à fréquence variable 360- 800Hz et +/-270 ou 0-540V DC) exigée dans les nouvelles générations d'avions combinée aux contraintes imposées par l'environnement avionique (baisse de pression liée à l'altitude, cycles de température et variation du taux d'humidité), risque de rendre l'existence de ces décharges inévitable.

D'où l'intérêt d'étudier la validité des lois de corrections présentées et de mieux comprendre les phénomènes physiques qui régissent le développement de la décharge dans cet environnement particulier. Ces études feront l'objectif de la deuxième partie de ce chapitre où nous allons faire largement appel aux notions présentées dans la première partie pour mieux comprendre les résultats expérimentaux obtenus.

II.2 Impact de l'environnement aéronautique sur les décharges dans l'air

Après avoir donné une description du dispositif expérimental ainsi que des protocoles expérimentaux suivis, nous présentons ensuite l'impact de la variation des différents paramètres atmosphériques sur la tension de claquage de l'air entre deux électrodes métalliques tout en exploitant la validité des expressions correctives rencontrées dans la littérature, ainsi que les phénomènes et les régimes de décharge mis en jeu. Nous tenterons d'expliquer ces résultats à l'aide des éléments de la physique des décharges présentés dans la première partie de ce chapitre. Pour finir, nous proposerons une nouvelle formule empirique pour le calcul de la tension de claquage pour des essais combinés de pression et de

température supérieure à 35°C.

II.2.1 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans notre étude est représenté sur les Figures II.13, II.14 et II.15.

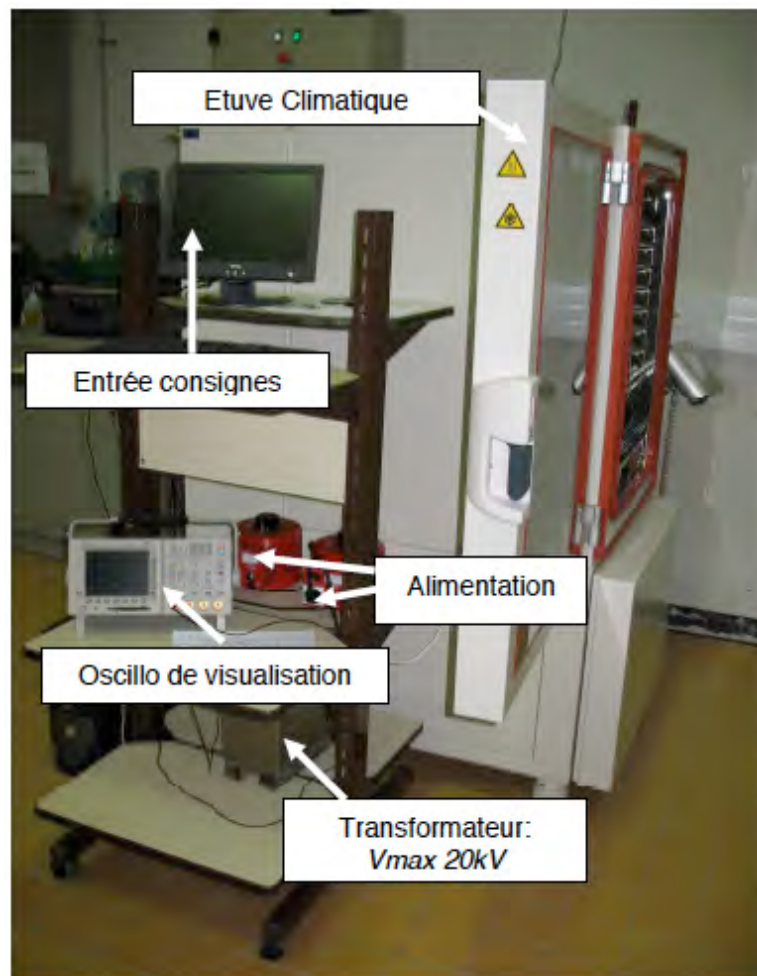


Figure II.13 Photographie du banc d'essai

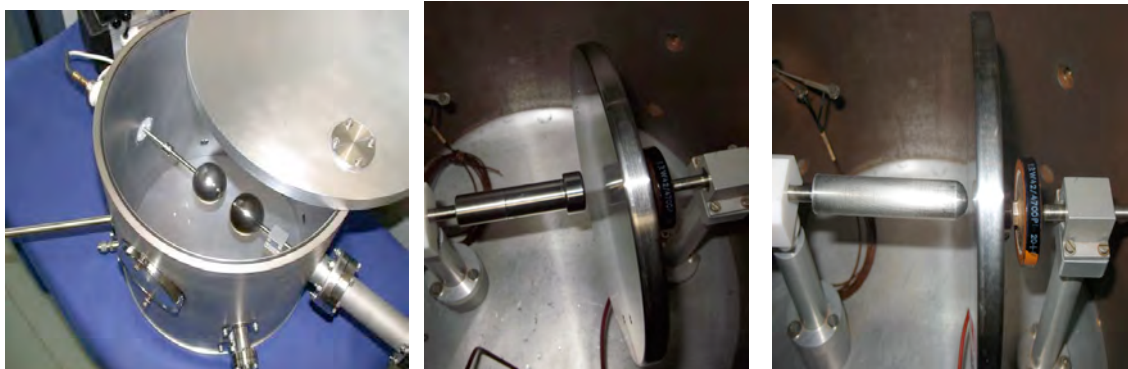


Figure II.14 Photographie de l'enceinte basse pression et des électrodes

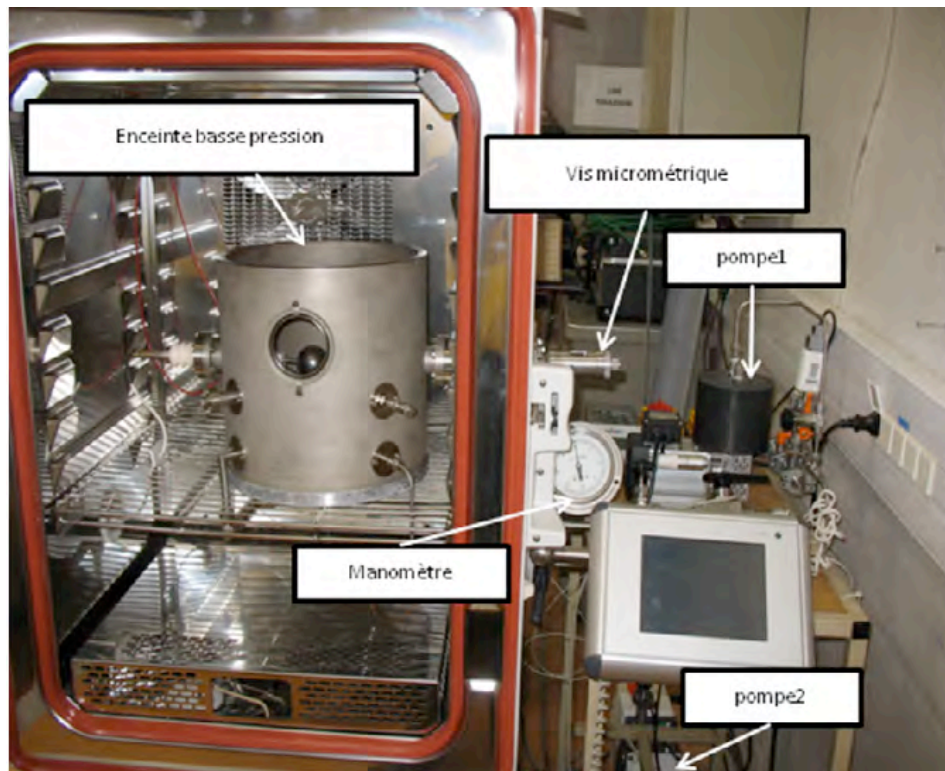


Figure II.15 Photographie globale du banc d'essai

Le schéma synoptique de l'ensemble des équipements est présenté par le diagramme de la Figure II.16.

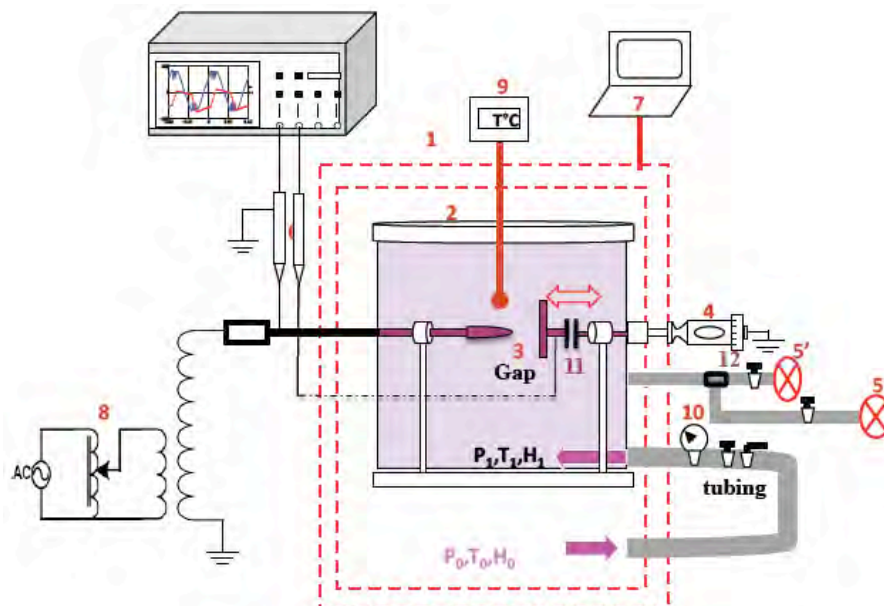


Figure II.16 Circuit de mesures et dispositif expérimental: 1-chambre climatique ; 2-enceinte basse pression ; 3-gap ; 4-vis micrométrique; 5,5'- pompes; 6-sonde de tension ; 7-ordinateur; 8-source de tension ; 9-thermocouple; 10-manomètre ; 11- capacité de mesure.

Le banc expérimental est constitué d'une étuve climatique (1) dont les caractéristiques sont décrites en [annexe 2]. Une enceinte basse pression (2) d'environ 0.02m^3 , contenant des électrodes en inox (3) représentées sur la Figure II.14, est placée à l'intérieur de cette étuve.

L'une des électrodes est fixée sur un axe solidaire d'une vis micrométrique (4) permettant de régler la distance inter électrodes d . Une capacité (11) est insérée en série entre l'électrode et la masse permettant de mesurer l'énergie dissipée par les décharges pendant une période. Les différentes configurations d'électrodes sont en acier inoxydable. D'une manière générale, ce matériau présente une bonne résistance à la corrosion dans toute une gamme d'environnements. Sa composition est présentée dans le Tableau II.4.

Eléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Pourcentage	0.08	2.0	0.75	0.045	0.03	16.0- 18.0	10.0- 14.0	2.0- 3.0	0.1

Tableau II.4 Composition des électrodes [www.sepha.com/stainless.htm]

Ce banc permet de balayer des températures sur une plage de -65 à 175°C , des baisses de pressions jusqu'à 0.1 atmosphère et d'ajuster le taux d'humidité relative de 10 à 98% sur une plage de température selon le climatogramme de la Figure II.17. Les consignes pour le conditionnement de l'atmosphère de l'étuve sont fixées à l'aide d'un ordinateur (7) et réglées dans l'enceinte basse pression à l'aide des vannes (12). Deux pompes (5 et 5') connectées en parallèle et fonctionnant simultanément en fonction de la température permettent l'obtention de niveaux de pression jusqu'à 10^{-2}mbars ($\sim 7.10^{-2}\text{Torr}$) à température ambiante. La lecture du niveau de pression se fait à l'aide d'un manomètre (10). La température à l'intérieur de l'enceinte est mesurée à l'aide du thermocouple (9).

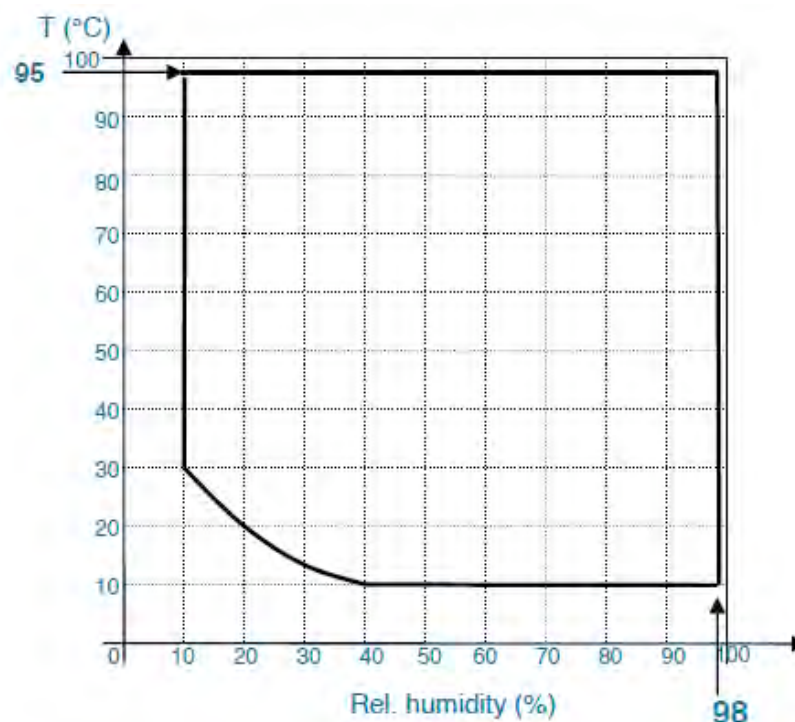


Figure II.17 Climatogramme de l'enceinte utilisée.

Afin de minimiser les erreurs sur la distance entre les électrodes liées à la dilatation différentielle des matériaux, celle-ci n'est fixée qu'une fois l'environnement thermiquement stable. Le protocole de mesures doit donc être clairement défini et est présenté dans ce qui suit.

II.2.2 Mode opératoire et protocoles expérimentaux

II.2.2.1 Essais en température-humidité

Le climatogramme présenté sur la Figure II.17 définit la plage possible des essais combinés « température-humidité ». Une fois que les conditions fixées sont stables, on effectue le réglage de la distance inter-électrodes et on procède aux essais. L'enceinte à l'intérieur de laquelle se trouve la cellule étant fermée, le conditionnement s'effectue par circulation d'air prélevé à l'intérieur de l'étuve, les vannes de régulation étant ouvertes. Il est important de constater que des résultats identiques sont obtenus même si l'enceinte est ouverte.

A température constante, il est possible de régler la distance inter-électrodes une fois pour toute et de procéder ensuite à un balayage en humidité.

II.2.2.2 Essais en pression simulant des variations d'altitude

Les vannes de prélèvement étant fermées, la mise en marche de la pompe permet d'effectuer des essais à des pressions inférieures à la pression atmosphérique. Si un conditionnement est souhaité, on jouera sur les vannes de pompage et de prélèvement pour obtenir le couple (P, T) souhaité.

II.2.2.2.1 Pompage

L'obtention d'une dépression est réalisée à l'aide de deux pompes disposées en parallèle (5 et 5' sur la Figure II.16) qui présentent des caractéristiques différentes, notamment au niveau de la puissance et de la plage de fonctionnement en température. La plus puissante (pompe primaire à palettes) fonctionne à température ambiante et permet d'atteindre un vide primaire de l'ordre de 10^{-2} mbar. La deuxième (pompe à membranes) sert à maintenir le niveau de pression pour un conditionnement sur une large gamme de température. La Figure II.18 résume par un schéma synoptique le protocole d'essais.

II.2.2.2.2 Réglage de la distance interélectrodes

La distance entre les électrodes est réglée à l'aide de la vis micrométrique. Le point zéro (point de contact des électrodes) est déterminé par un test électrique. Les électrodes étant en

court circuit, elles sont écartées progressivement jusqu'à atteindre une position dans laquelle le système se comporte électriquement comme un circuit ouvert. C'est le point référence « zéro » à partir duquel nous fixons la distance d .

L'erreur lors de cette manipulation est au maximum de $5\mu\text{m}$.

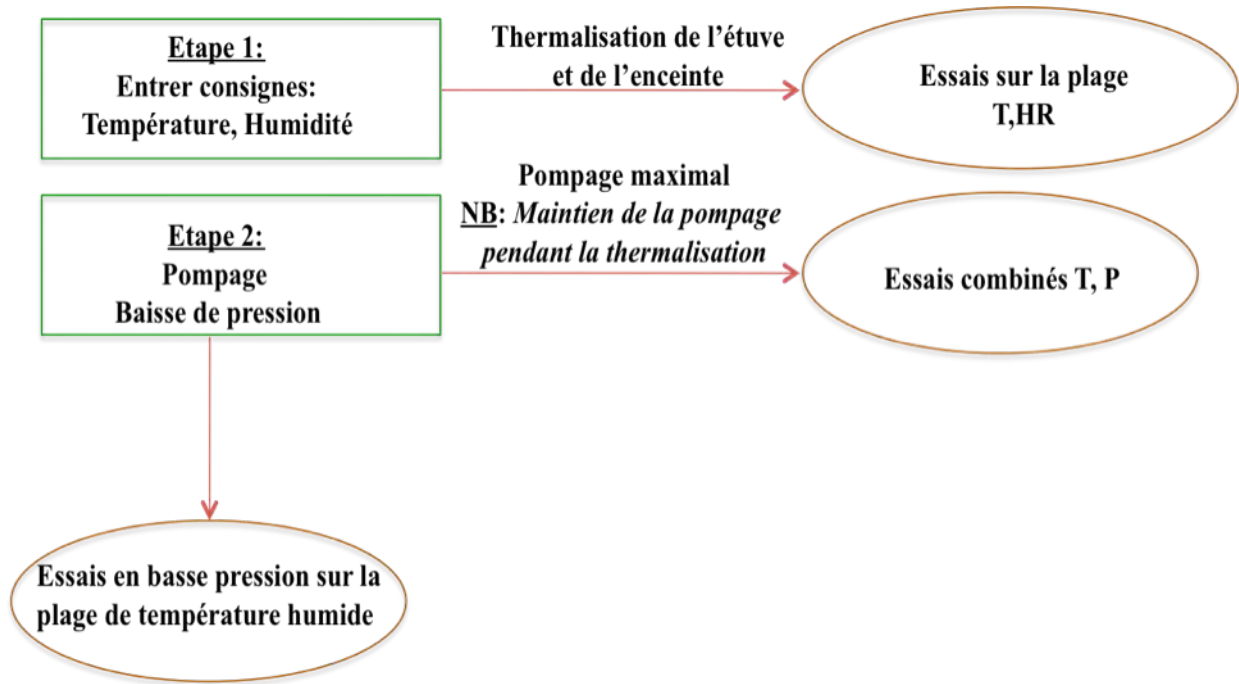


Figure II.18 Schéma synoptique du protocole d'essai.

II.2.2.3 Mesure de la tension de claquage et de l'énergie dissipée

La Figure II.19 montre le montage électrique utilisé pour la mesure de la tension d'apparition des décharges et de l'énergie dissipée par les décharges. La tension appliquée est mesurée à l'aide d'une sonde haute tension, et tous les signaux électriques sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope numérique. Une résistance ($R=1\text{M}\Omega$) est utilisée pour limiter le courant lors de la rupture.

La rupture de l'air est caractérisée par une chute de tension et est observée sur l'oscilloscope (Figure II.19). Généralement, la rupture se produit au maximum de la tension correspondant à la valeur de la tension seuil de rupture du gaz et ceci de manière reproductible à chaque période.

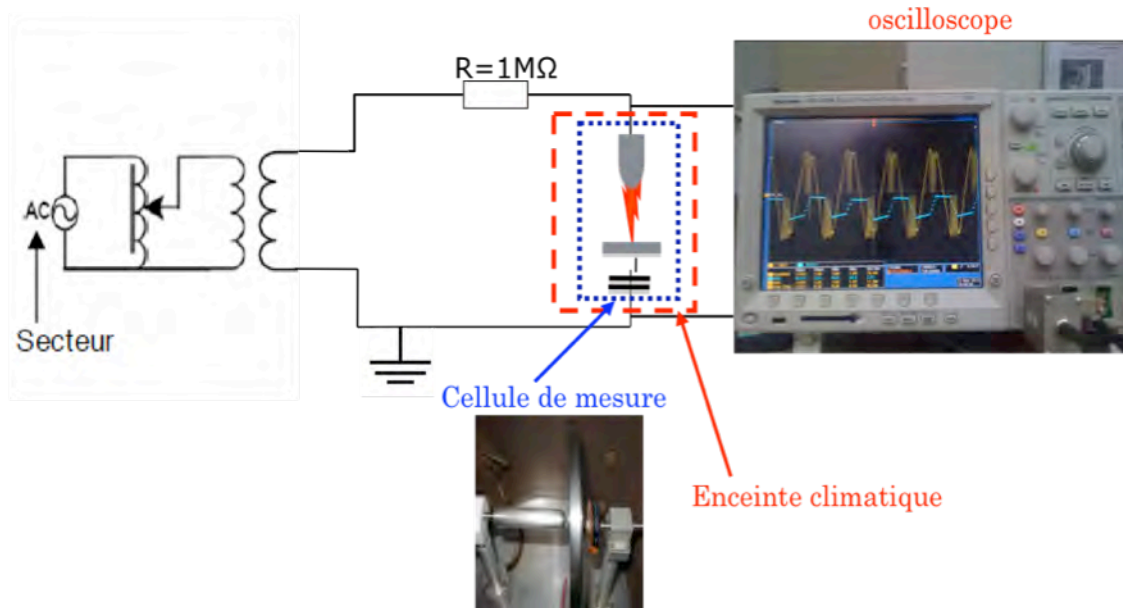


Figure II.19 Schéma électrique de mesure.

Pour déterminer l'énergie consommée dans la décharge par période, la méthode décrite précédemment en utilisant la figure de Lissajous (courbe charge - tension) a été utilisée. Cette méthode nécessite la mise en série avec les deux électrodes test d'un condensateur C comme illustré sur la Figure II.19. La valeur de ce condensateur doit être très supérieure (quelques nF) à celle du condensateur équivalent des deux électrodes (quelques pF). La présence d'une décharge se caractérise par la baisse de la tension aux bornes du dispositif sous test (courbe jaune) et une augmentation de la tension aux bornes de la capacité de mesure au moment de la décharge (courbe bleue) comme observé sur l'oscilloscope de la Figure II.19.

A l'aide de l'oscilloscope, ces courbes de tension sont transformées en une figure de Lissajous (Figure II.20). Si la tension aux bornes du gaz n'est pas suffisante pour déclencher une décharge, la tension V et la charge C sont en phase et la courbe ($Q-V$) est une ligne droite. Quand la tension devient suffisamment élevée pour initier le claquage, cette ligne droite s'ouvre à cause du transfert des charges (phase 1). Cette phase dure tant que la pente de la tension est positive. Puis la tension diminue et le plasma s'éteint (phase 2) jusqu'au début de l'alternance négative durant laquelle le transfert de charges reprend (phase 3). Enfin, la pente de la tension s'inverse à nouveau et le plasma reste éteint jusqu'à la prochaine tension de claquage (phase 4). Pour une période complète la figure de Lissajous est un parallélogramme dont un exemple est donné en Figure II.20 et dont la surface est proportionnelle à l'énergie injectée dans le gaz [DON08].

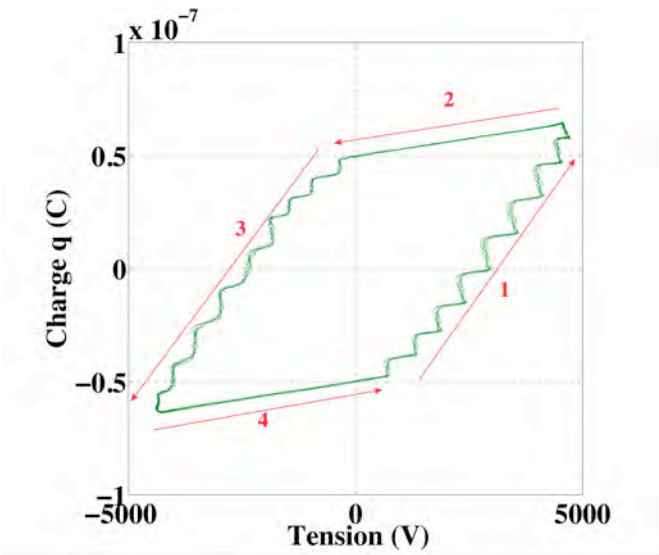


Figure II.20 Exemple d'une figure de Lissajous obtenue

II.2.3 Résultats et discussions

Plusieurs configurations d'électrodes ont été utilisées pour représenter les éventualités rencontrées dans les configurations réelles et afin d'établir une cartographie complète des différentes géométries des installations. Ces configurations sont les suivantes : a) Rogowski/Rogowski, b) Pointe/Plan, c) Rogowski/Plan.

(a) Rogowski-Rogowski	(b) Pointe -Plan	(c) Rogowski-Plan

Tableau II.5 Les électrodes expérimentales utilisées

Pour la configuration pointe/plan, trois pointes ont été utilisées et caractérisées chacune par un rayon de courbure.

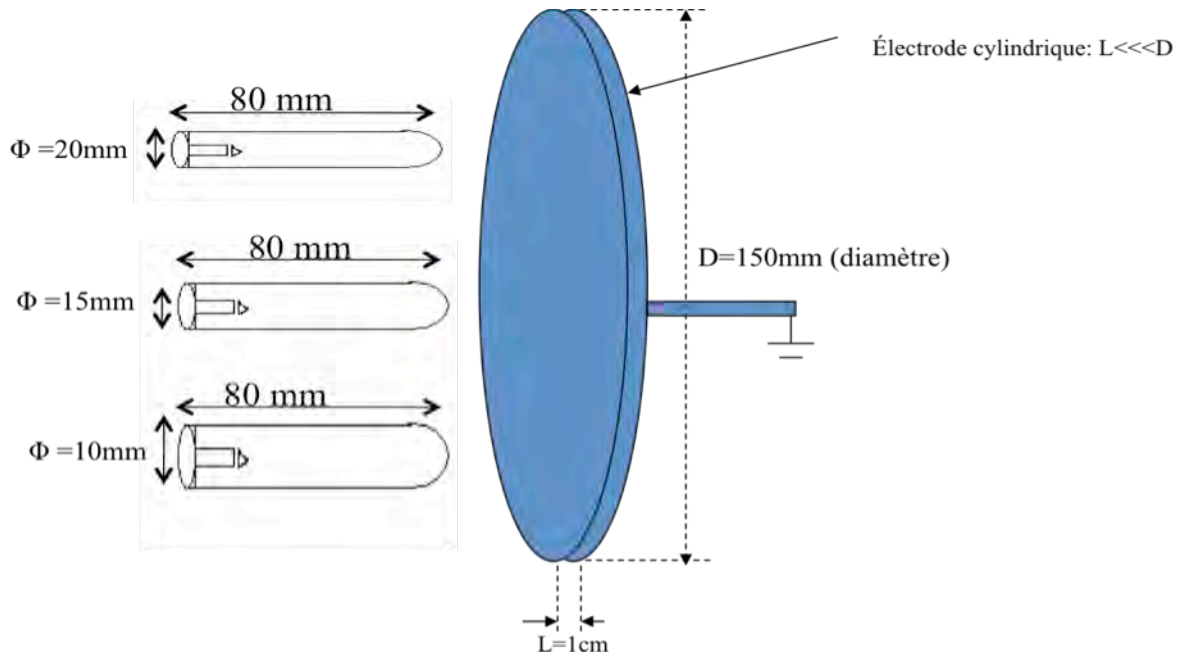


Figure II.21 Dimensions géométriques des électrodes

Afin d'étudier l'influence de la variation de la géométrie des électrodes sur les valeurs de la tension de claquage, les mêmes conditions expérimentales ont été appliquées sur ces différentes configurations.

Quelle que soit la configuration d'électrodes utilisée, une distance interélectrodes de 1mm a été fixée. La Figure II.22 présente la variation de la tension de claquage en fonction de la pression sous température ambiante pour les 5 configurations proposées ci dessus.

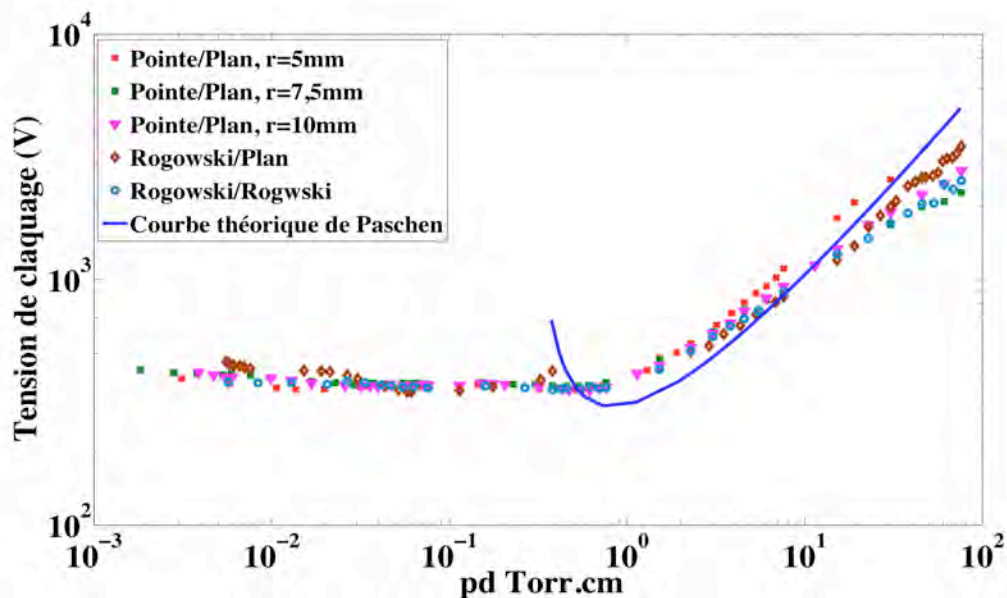


Figure II.22 Variation de la tension de claquage en fonction de la pression pour différentes configurations d'électrodes

On remarque que quelle que soit la configuration d'électrodes utilisée, les valeurs de la tension de claquage sont presque les mêmes. En effet, si le rayon de courbure « r » des électrodes est bien supérieur à la distance interélectrodes « d », on peut considérer le champ électrique comme uniforme. Aussi, puisque dans notre cas r est très supérieur à d , on peut considérer qu'on est toujours dans une configuration plan/plan et par conséquent presque les mêmes valeurs de la tension de claquage sont obtenues et les mêmes comportements sont observés.

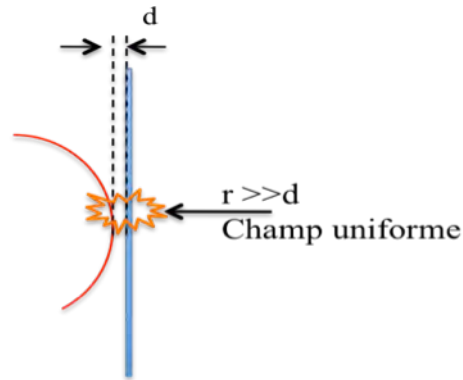


Figure II.23 Nature du champ électrique entre deux électrodes ayant un rayon de courbure $\gg d$

Aussi, dans ce qui suit, nous nous limiterons à la présentation des résultats obtenus dans le cas pointe/plan qui est représentatif d'un câble passant à côté d'un plan (voir Figure II.24). A chaque fois, plusieurs expériences ont été réalisées pour chaque condition, vérifiant ainsi la reproductibilité de nos résultats expérimentaux.

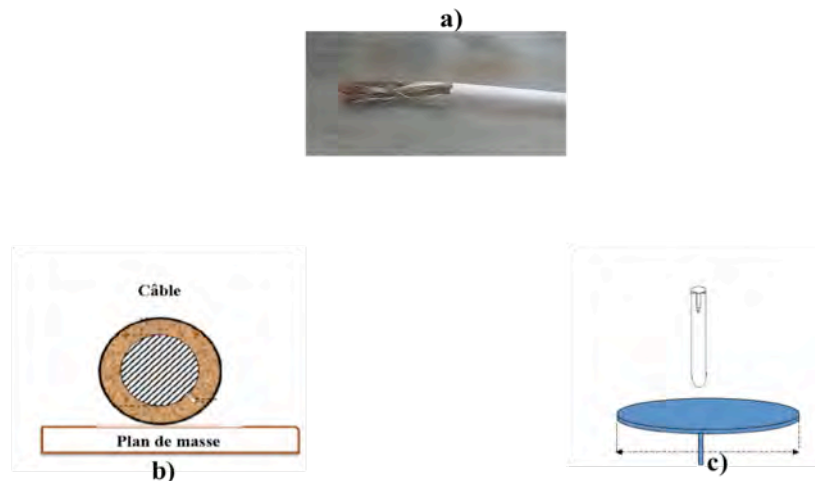


Figure II.24 a) configuration réelle, b) vue en coupe, c) éprouvette canonique.

II.2.3.1 Effet de la variation des paramètres environnementaux sur la partie droite de la courbe de Paschen

La courbe de Paschen théorique a été obtenue en faisant varier la distance interélectrodes dans des conditions normales de température et de pression. Or, la variation des conditions atmosphériques a exigé l'introduction des expressions correctives à cette loi, dont deux déjà

citées ci dessus, qui sont les corrections de Peek et de Dunbar. Dans un premier temps nous allons étudier la validité de ces corrections sous différentes valeurs de températures en faisant varier :

- soit la distance tout en fixant la pression à la pression atmosphérique,
- soit la pression tout en fixant la distance interélectrodes.

II.2.3.1.1 Variation de la distance interélectrodes

La Figure II.25 présente la superposition de certains de nos résultats en comparaison avec ces corrections proposées dans la littérature.

Ces points sont obtenus en faisant varier la distance interélectrodes sous pression atmosphérique, et pour deux températures différentes : $T=-25^{\circ}\text{C}$ et 125°C .

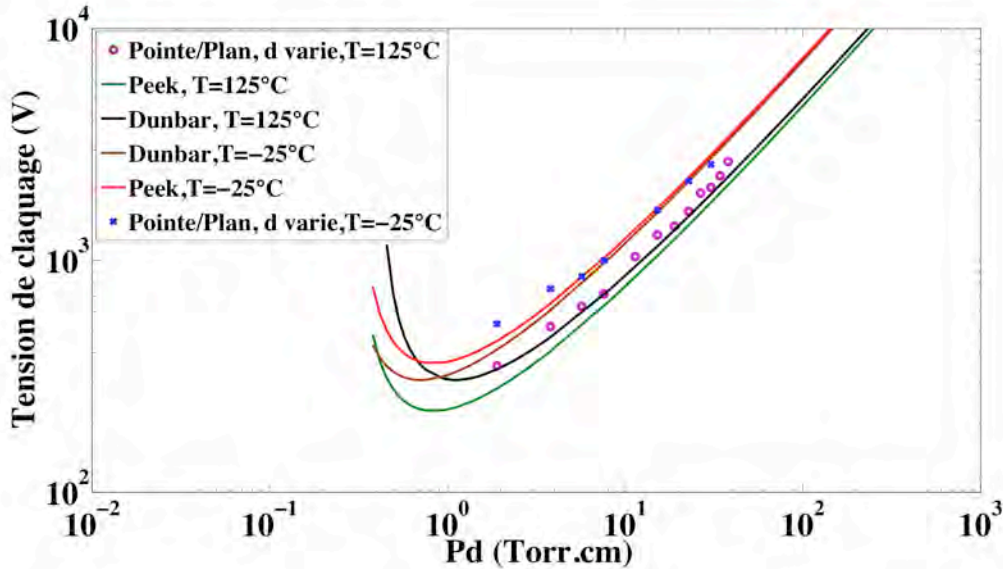


Figure II.25 Variation de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrodes pour différentes températures avec $P=760$ Torr: a) $T=-25^{\circ}\text{C}$, b) $T=125^{\circ}\text{C}$.

Les points expérimentaux obtenus pour une température inférieure à 25°C ($T=-25^{\circ}\text{C}$) sont superposés à la courbe de Peek (calculée à partir de l'expression (II.23)), tandis que ceux obtenus pour une température supérieure à 25°C ($T=125^{\circ}\text{C}$) sont superposés à celle de Dunbar (calculée à partir de l'expression (II.25)) comme le montre la Figure II.25.

De plus, on remarque qu'à droite du minimum de Paschen, pour une valeur de pd fixe, la tension de claquage diminue lorsque la température augmente. Cette diminution peut être expliquée en se référant à la densité de l'air par conséquent au lpm des électrons :

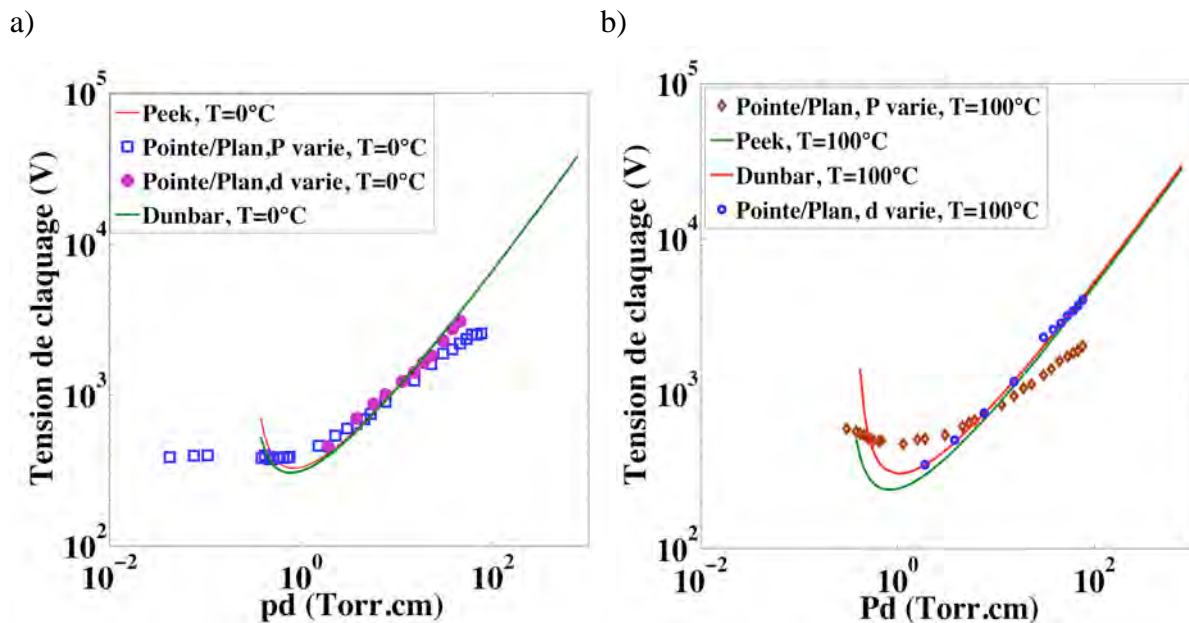
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\delta} = \lambda_0 * \frac{p_0}{p} * \frac{T}{T_0}$$

Une augmentation de température est équivalente à une diminution de la densité de l'air, par conséquent à *une augmentation du libre parcours moyen*. Donc pour une même pression mais pour une température plus élevée, la décharge est déclenchée par une tension plus basse : les électrons accélérés entre deux collisions, sous l'action d'un champ électrique, *traversant une distance plus élevée*, acquièrent plus d'énergie. Cet apport d'énergie gagné par les électrons leur permet d'ioniser les molécules et déclencher une décharge sans avoir recours à des tensions plus élevées.

Or dans le domaine aéronautique, les SIE peuvent être soumis à des variations de pression induites par les variations d'altitudes, d'où l'intérêt d'étudier l'impact de la variation de la pression sur la tension d'apparition des décharges tout en maintenant une distance interélectrodes fixe.

II.2.3.1.2 Variation de la pression

Afin d'étudier la validité de ces corrections pour des variations combinées de température et de pression, des essais ont été réalisés pour une distance interélectrodes de 1mm, en faisant varier la pression sous différentes températures. La Figure II.26 présente la variation de la tension de claquage en fonction de la distance (pour $p=760\text{Torr}$) et de la pression ($d=1\text{mm}$) pour deux températures différentes : $T=0^\circ\text{C}$ et 100°C .



On note d'après la Figure II.26a que pour une température inférieure à 25°C ($T=0^\circ\text{C}$) les points expérimentaux obtenus en faisant varier la pression ou la distance, à droite du minimum de Paschen sont en corrélation avec la correction de Peek, tandis que les points expérimentaux qui sont à gauche du minimum de Paschen ne suivent plus le comportement de ces courbes. Ce phénomène sera expliqué dans la partie suivante.

En revanche, pour une température élevée ($T > 25^{\circ}\text{C}$) les points expérimentaux obtenus pour une variation combinée de température et de pression ne suivent plus le comportement de la courbe de Dunbar ni celle de Peek (voir Figure II.26b). Nous tenterons de proposer une nouvelle loi de correction dans cette situation.

En conclusion :

- Pour des produits $pd > pd_{min}$, la correction de Peek est appliquée pour des variations de distance ou de pression sous des faibles valeurs de température ($T < 25^{\circ}\text{C}$).
- La correction de Dunbar est validée pour des variations de distance sous l'application de températures élevées ($T > 25^{\circ}\text{C}$) à la pression atmosphérique, alors que pour des variations combinées de température et de pression cette correction n'est plus applicable.

II.2.3.2 Effet de la variation des paramètres environnementaux sur la partie gauche de la courbe de Paschen

Nous proposons dans un premier temps d'étudier l'impact des variations combinées de température et de pression sur la tension d'apparition des décharges, plus particulièrement pour des produits pd (pression x distance) inférieurs à pd_{min} . La Figure II.27 présente un exemple de la variation de la tension de claquage en fonction de la pression sous différentes températures pour un gap d'air de 1mm. Nous remarquons que pour des faibles valeurs de pression ($p < p_{min}$) l'allure de la tension diffère suivant la valeur de la température appliquée.

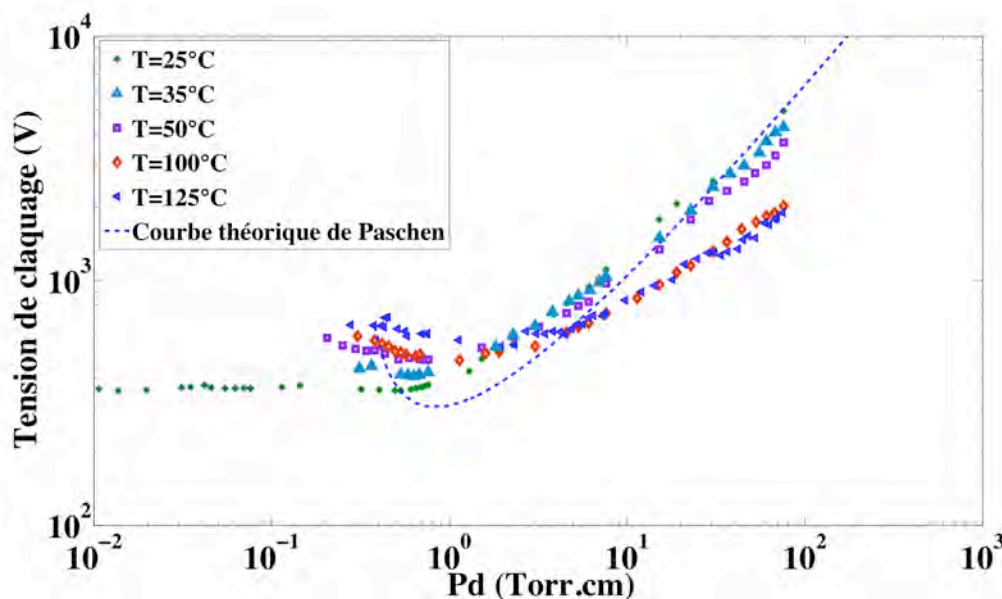


Figure II.27 Variation de la tension de claquage en fonction de la pression sous différentes températures (d=1mm), (Pointe/Plan)

Cette différence se traduit par une augmentation de la tension avec la diminution de la pression pour des températures élevées alors qu'elle reste constante pour des faibles valeurs de température. Pour tenter d'expliquer cette différence de comportement par une approche théorique, le calcul du libre parcours moyen des électrons a été utilisé.

II.2.3.2.1 Calcul du libre parcours moyen

Le calcul du lpm s'est basé sur le premier coefficient de Townsend, où le lpm est donné par l'équation suivante [DAV06]:

$$\lambda = \frac{1}{\alpha} \quad \text{II.37}$$

A température ambiante, ce coefficient est calculé par l'équation :

$$\alpha = Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad \text{II.38}$$

Alors que pour des températures élevées une autre expression empirique qui tient compte de la variation de la densité de l'air " δ " est utilisée pour le calcul [LON04]:

$$\alpha = 1400 * \delta * \left(\frac{E}{3,1 * 10^8 * \delta} - 1\right)^2 \text{ cm}^{-1} \quad \text{II.39}$$

Les valeurs du champ électrique sont calculées d'après l'équation suivante :

$$E = \frac{V_{mes}}{d} \quad \text{II.40}$$

Quelle que soit la valeur de la température ou de la pression appliquée la valeur de d est fixe et égale à 1mm. Par contre les valeurs de V_{mes} correspondent aux valeurs expérimentales obtenues.

Pour des températures inférieures ou égales à 25°C les équations (II.37) et (II.38) sont utilisées, alors que pour des températures supérieures à 25°C les équations (II.37) et (II.39) sont appliquées. La Figure II.28 montre la variation du lpm des électrons en fonction de la pression (pour $p < p_{min}$) pour différentes températures :

- Pour des valeurs de température élevées, le libre parcours moyen des électrons devient plus grand que l'espace interélectrodes ($\lambda > d = 1\text{mm}$). Dans ce cas là, le claquage électrique est dû au « *vacuum mechanism* » [OSM93].
- Alors que pour des températures inférieures à 25 °C, le lpm devient inférieur à la distance interélectrodes, et le mécanisme responsable du claquage est le « *gaz* »

mechanism » [OSM93].

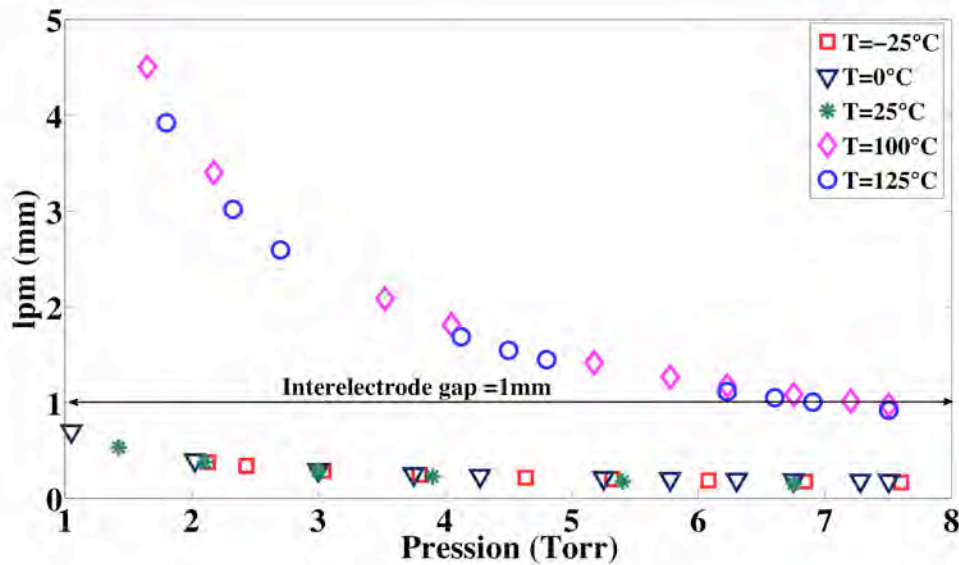


Figure II.28 Les valeurs calculées du libre parcours moyen des électrons pour différentes températures (Pointe/Plan)

Ces deux mécanismes de claquage sont détaillés dans la partie suivante.

II.2.3.2.2 Identification des Mécanismes de décharges à gauche du minimum de Paschen

Il a été démontré que suivant la valeur de la température appliquée deux mécanismes différents régissent le développement de la décharge à gauche du minimum de Paschen:

II.2.3.2.2.1 Pour des faibles valeurs de température : *Gaz mechanism*

A la différence de la courbe de Paschen, pour laquelle la tension est augmentée pour initier les décharges pour des produits pd inférieurs au minimum, les points expérimentaux représentés sur la Figure II.27, obtenus en faisant varier la pression pour une distance interélectrodes fixe et à la température ambiante restent sur un palier correspondant à la valeur de la tension minimale.

En effet, pour des faibles valeurs de pd , à très basse pression, la densité du gaz est faible et par conséquent le libre parcours moyen des électrons est grand (mais reste inférieur au gap), mais à cause de la raréfaction de la matière la multiplication électronique dans l'espace interélectrodes n'est pas suffisante pour en déclencher une décharge. Les électrons provoquant la décharge sont donc alors sur les lignes de champ électrique où ils peuvent rencontrer sur leur chemin plus de molécules. Le nombre d'ions croît sous l'effet de la multiplication arrivant à un moment où les conditions d'obtention d'une décharge sont

accomplies. Dans ce cas là, les électrons ont choisi la plus longue mais énergétiquement la plus favorable distance le long des lignes de champs $d_1, d_2 \dots d_i$ (voir Figure II.29).

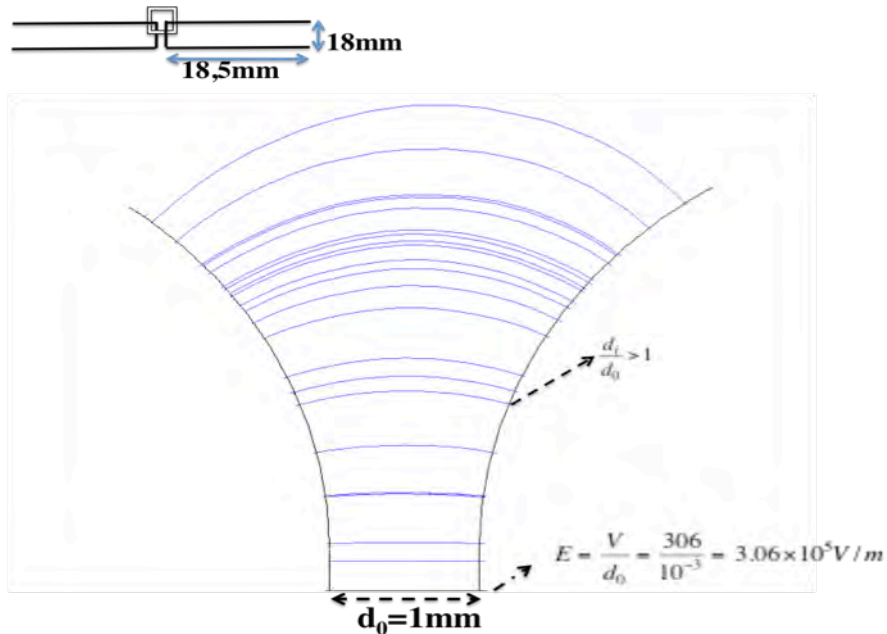
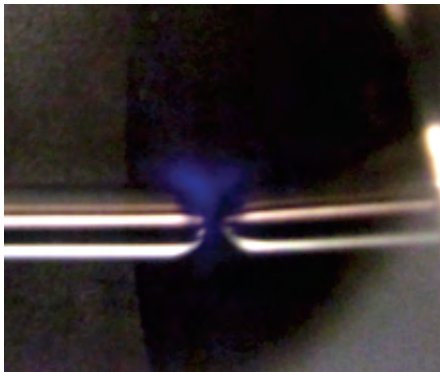


Figure II.29 Simulation des lignes de champs entre deux électrodes métalliques ($d_0=1\text{mm}$).

Comparativement à une décharge à pression atmosphérique pour laquelle nous observons l'établissement d'une étincelle filamenteuse entre les deux points les plus rapprochés des électrodes, une lueur lumineuse est obtenue, dont le volume augmente avec la diminution de la pression, comme le montre la Figure II.30.

a)



b)



Figure II.30 Photographie d'une décharge prise par un appareil de photo numérique, dans un gap d'air de 1mm entre deux électrodes métalliques a) décharge sous basse pression ($p=2\text{Torr}$), b) décharge sous pression atmosphérique

Ce n'est donc plus la distance interélectrodes qui est importante dans ces conditions mais la pression. La « vraie » distance de rupture correspond alors à la longueur de la ligne de champ à la pression considérée. Le claquage se produisant tout le long des lignes de champs $d_i > d_0$ (Figure II.29) (c.-à-d., dans la région où le champ électrique n'est pas homogène [OSM07]) est dû au **gas mechanism** et ne peut plus être associé à un champ uniforme et par suite les

conditions ne correspondent plus à celles nécessaires à l'obtention de la courbe théorique de Paschen.

En tenant compte de ces considérations, et en prenant pour $p < p_{\min}$ une valeur de tension constante équivalente à $V_{\min}=306$ V au lieu de celles calculées par l'équation (II.22), la courbe de Paschen est ainsi modifiée. La nouvelle courbe théorique modifiée est en corrélation avec nos points expérimentaux comme illustré sur la Figure II.31.

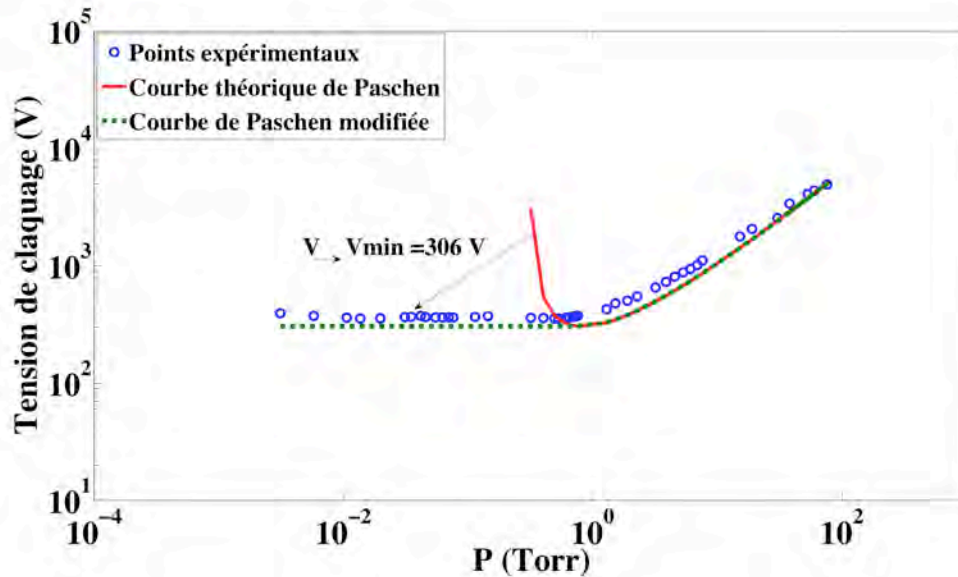


Figure II.31 Comparaison des résultats expérimentaux avec la courbe modifiée de Paschen

II.2.3.2.2 Pour des valeurs de température élevées : *Vacuum mechanism*

Pour des températures supérieures à 25 °C, les valeurs de la tension de claquage obtenues en faisant varier la pression, augmentent en diminuant la pression à gauche du minimum de Paschen (voir Figure II.27).

D'après la loi des gaz parfaits, pour une même pression appliquée, en augmentant la température la densité du gaz diminue et par conséquent le libre parcours moyen des électrons augmente. On se trouve alors face à un autre mécanisme de claquage appelé vacuum mechanism. Il existe plusieurs mécanismes physiques responsables de la rupture électrique dans un vacuum gap. Dans nos expériences réalisées dans un « low vacuum », l'initiation du claquage ne peut pas être reliée à la théorie d'émission par effet de champ ou la théorie de Fowler Nordheim, vue que cette dernière nécessite des champs électriques élevés et de l'ordre de 10^9 V/m (High vacuum) qui sont bien plus élevés que les valeurs du champ calculées dans nos expériences. La tension de claquage maximale mesurée à gauche du minimum pour des températures supérieures à 25°C et pour un gap d'air de 1mm est de 600V et la valeur du champ électrique correspondante est de l'ordre de 10^5 V/m (low vacuum). Ainsi, le phénomène que nous avons observé peut être expliqué, si nous nous référons à la littérature [MES83][DAV66][LAV55], par une diminution du travail de sortie de la cathode, en raison

de la disponibilité des gaz adsorbés sur sa surface. Sous l'effet de la température, ces molécules adsorbées sur la surface vont être dissociées, entraînant une augmentation de la densité des ions d'au moins un ordre de grandeur par rapport à celle à la température ambiante. Les électrons se retrouvent alors dans une région entre les deux électrodes où la pression est plus élevée que celle appliquée au système. Compte tenu de la présence de plus de particules dans l'espace interélectrodes d'une part, et la diminution du lpm des électrons dans cette région où la pression est plus élevée d'autre part, il apparaît que les conditions nécessaires à l'obtention d'une décharge et notamment le phénomène de multiplication électronique sont remplies. Les électrons provoquant la décharge restent confinés dans le gap et ne sont plus obligés de remonter les lignes de champ. La décharge se développe dans la partie centrale de la zone interélectrodes, c'est à dire dans la région où le champ électrique est homogène [OSM07]. Ce mécanisme est appelé *vacuum mechanism*, et la nature de la décharge diffère de celle obtenue à température ambiante.

En conclusion, il a été démontré que selon la température, deux différents mécanismes de claquage peuvent se produire à gauche du minimum de Paschen, et la nature de la décharge diffère. Quantitativement le type de décharge peut être décrit en terme d'énergie fournie à l'espace interélectrodes, et pour renforcer nos interprétations nous avons eu recours à des mesures d'énergie.

II.2.3.2.3 Mesures de l'énergie dissipée par les décharges

Des mesures d'énergie des décharges électriques pour des variations combinées de température et de pression sont réalisées en insérant une capacité de 4,7nF en série avec les deux électrodes comme illustré sur la Figure II.19. D'après la Figure II.32 qui montre la variation de l'énergie en fonction de la pression pour plusieurs températures, plusieurs informations peuvent être déduites concernant la partie de la courbe à gauche du minimum de Paschen :

- 1) Les valeurs d'énergie mesurées pour des température supérieures à 25°C sont plus élevées d'au moins un ordre de grandeur que celles mesurées à 25°C. Ce résultat confirme la présence de deux régimes de décharges différents dépendant de la température.
- 2) L'ordre de grandeur des énergies mesurées à gauche du minimum, pour des températures élevées, est similaire à celui mesuré dans un certain intervalle de pression à droite. Par exemple pour $T=80^{\circ}\text{C}$, l'énergie mesurée pour une pression de 6Torr (8mbar) est de 2.10^{-5} J, de même ordre de grandeur que celle mesurée pour $p=60\text{Torr}$ (80mbar). Par conséquent, notre hypothèse sur le développement de la décharge dans l'espace interélectrodes où la pression devient plus élevée que celle

appliquée macroscopiquement dans le cas du *vacuum mechanism*, est vérifiée par ces mesures d'énergie.

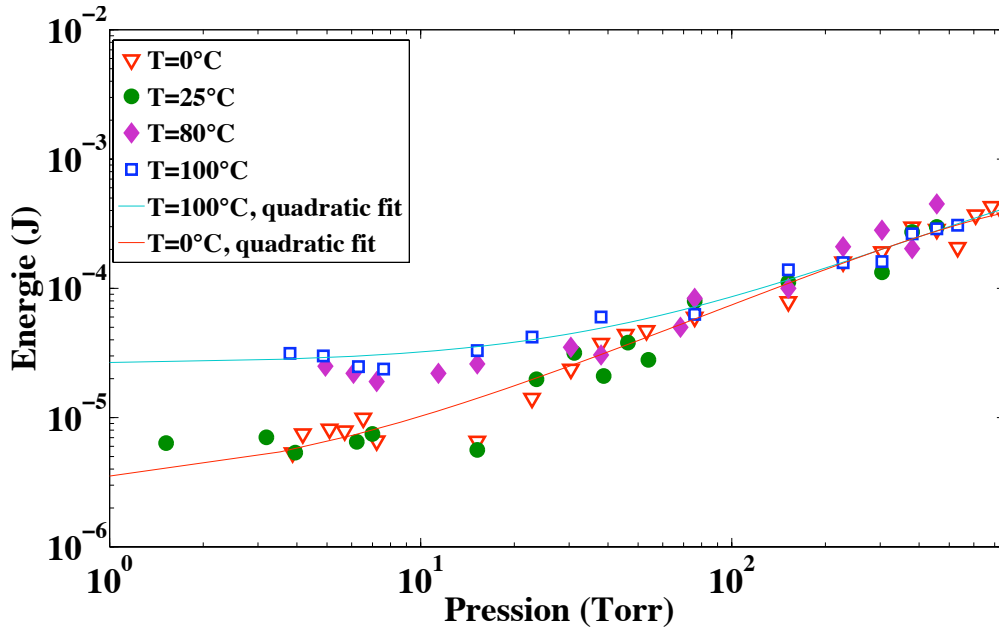


Figure II.32 Variation de l'énergie en fonction de la pression pour différentes températures.

II.2.3.2.4 Identification du régime de décharge à l'aide de la figure de Lissajous

Pour distinguer les différents régimes de décharge mis en jeu suivant la température, la figure de Lissajous a été utilisée comme un critère permettant d'en identifier la nature. Pour une même valeur de pression ($p=6$ Torr) et une même distance interélectrodes ($d=1$ mm), la figure de Lissajous a été enregistrée pour deux valeurs de températures différentes : $T=25^\circ\text{C}$ et 80°C .

A. Pour $T=25^\circ\text{C}$:

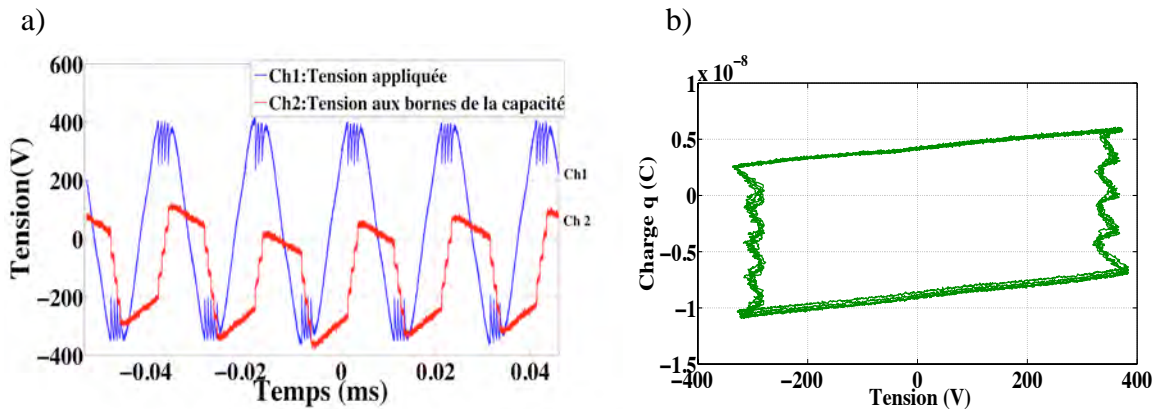


Figure II.33 Observation de : a) la tension appliquée aux bornes des deux électrodes et aux bornes de la capacité de mesure, b) la figure de Lissajous correspondante ($d=1$ mm, $p=6$ Torr, $T=25^\circ\text{C}$)

La variation de la tension appliquée aux bornes des électrodes et celle de la tension qui

apparaît aux bornes du condensateur au moment de l'apparition des décharges sont illustrées sur la Figure II.33a. On observe que l'apparition d'une décharge se traduit par une chute de tension aux bornes des deux électrodes et une augmentation de la tension aux bornes du condensateur.

En comparant les deux acquisitions présentées sur la Figure II.33a et 33b, on remarque que chaque décharge est représentée par un pas sur la partie gauche ou droite de la figure de Lissajous suivant qu'elle appartient à l'alternance négative ou positive respectivement. D'après la littérature cette forme de la figure de Lissajous se réfère à un régime de décharge lumineuse (voir Figure II.30a) [ZAN09] [HAO09].

B. Pour $T=80^{\circ}\text{C}$:

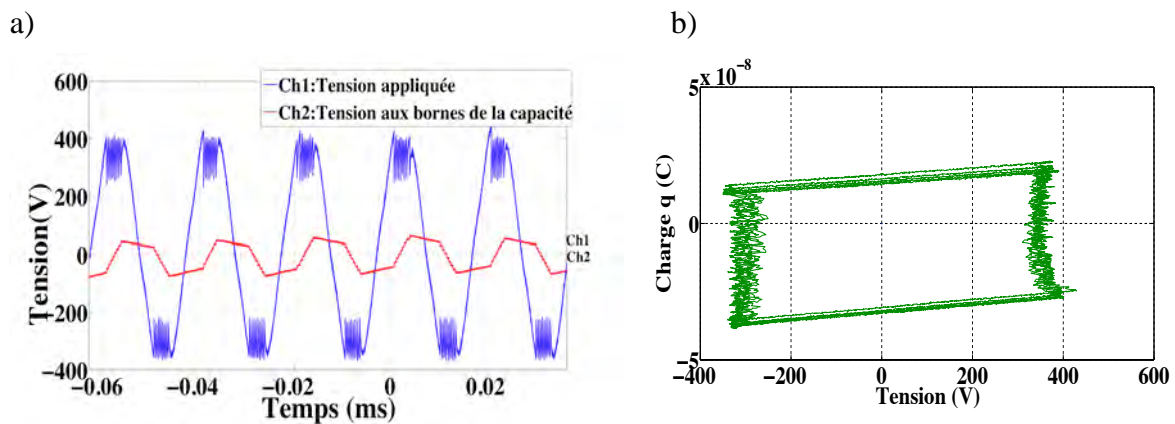


Figure II.34 Observation de : a) la tension appliquée aux bornes des deux électrodes et aux bornes de la capacité de mesure, b) la figure de Lissajous correspondante ($d=1\text{mm}$, $p=6\text{Torr}$, $T=80^{\circ}\text{C}$)

Contrairement à la figure de Lissajous dans le cas ci-dessus, la figure de Lissajous pour une température supérieure à 25°C est un parallélogramme régulier indiquant la présence d'un autre régime de décharge : *régime de décharge filamentaire*. Vu l'augmentation du nombre de décharges (voir Figure II.34a) l'amplitude du pas correspondant à chacune sur les parties gauche ou droite du parallélogramme (Figure II.34b) se réduit d'une façon que chaque décharge ne sera plus distinguée sur la figure de Lissajous [HAO09].

En conclusion, pour une même valeur de pression, une même distance interélectrodes, et pour deux températures différentes, deux régimes de décharges différents sont obtenus. Chaque régime est caractérisé par une figure de Lissajous qui lui est propre.

Après avoir étudié les effets de la température et de la pression sur la courbe de Paschen et leurs corrections, ainsi que sur la caractéristique de la décharge en énergie et en nature, nous pouvons conclure que ces grandeurs dépendent des conditions atmosphériques. En effet, il a été démontré que pour des faibles valeurs de température, en faisant varier soit la distance soit la pression, les valeurs de la tension de claquage sont déduites de la correction de Peek (pour $pd > pd_{min}$), tandis que pour des températures élevées, la variation de la tension de claquage en fonction de la distance, à la pression atmosphérique, est déduite de la correction de

Dunbar. Par contre, pour des variations combinées différents mécanismes de décharges sont mis en jeu et cette correction n'est plus valable. Ainsi, en se basant sur nos données expérimentales, nous avons essayé d'extraire une nouvelle formule empirique qui peut être appliquée dans ces conditions.

II.2.3.3 Proposition d'un facteur de correction

Comme le font la plupart des fonctions de correction existantes et explicitées précédemment, nous utilisons la densité de l'air « δ » comme coefficient de prédiction de la tension de claquage et expliqué dans le paragraphe suivant.

II.2.3.3.1 Méthode de synthèse

Comme exposé dans le paragraphe précédent, la tension de claquage mesurée en faisant varier la pression à la température ambiante, à gauche du minimum de Paschen n'est pas égale à celle calculée par l'expression (II.22). Elle est équivalente à $V_{\min}=306V$. Nous allons adopter comme référence la tension de Paschen ainsi modifiée et appelée $V_{Paschen.mod}$. Cette courbe de Paschen ainsi modifiée, montrée sur la Figure II.31, est définie comme suit :

- Pour des valeurs de pd supérieures à pd_{\min} , la tension de claquage est déduite de la loi de Paschen, elle est donc calculée par l'équation (II.22), tandis que pour des valeurs de pd inférieures à pd_{\min} , la tension de claquage est supposée égale à 306V quelle que soit la valeur de pd :

$$V_{Paschen. mod} = \begin{cases} \frac{Bpd}{118 + \ln(pd)} & \text{pour } pd > pd_{\min} \\ 306V & \text{pour } pd < pd_{\min} \end{cases}$$

Pour trois températures différentes 50-80-150°C, la tension de claquage a été mesurée en fonction de la pression pour une distance interelectrodes fixe ($d=1mm$), ces valeurs obtenues expérimentalement sont représentées par « V_{mes} ». Pour chaque point mesuré, nous avons calculé la valeur de la densité de l'air correspondante. Le rapport $V_{Paschen.mod}/V_{mes}$ est tracé en fonction de la densité de l'air δ pour les trois températures (voir Figure II.35).

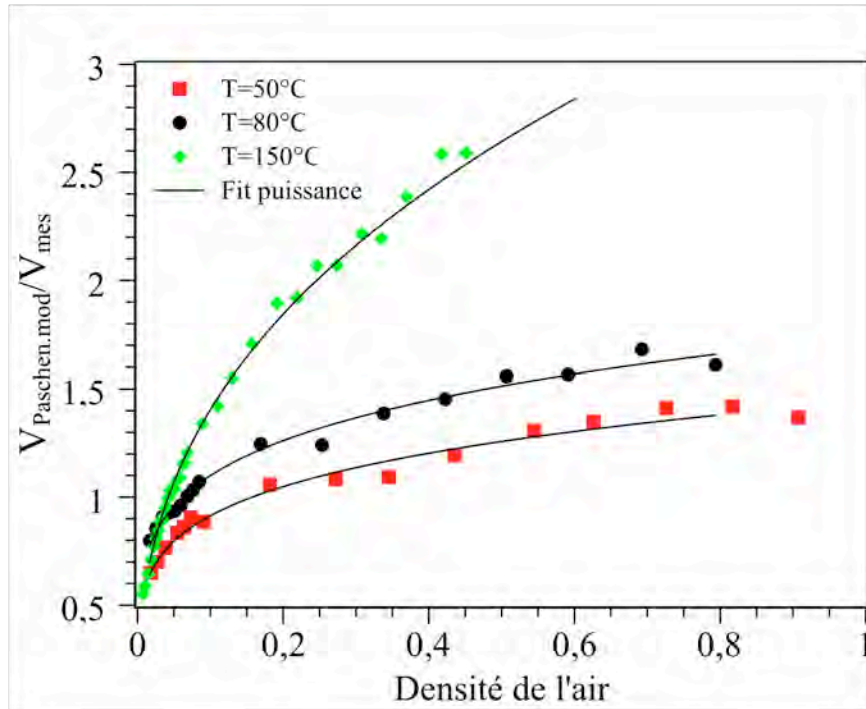


Figure II.35 Rapport de $V_{Paschen.mod}/V_{mes}$ Vs. densité de l'air pour différentes températures

D'après la Figure II.35, nous pouvons remarquer que la variation de $V_{Paschen.mod}/V_{mes}$ en fonction de la densité de l'air suit une loi de puissance. Par conséquent un facteur K_{Ti} dépendant de la densité de l'air et de deux variables a et b est extrait sous la forme :

$$K_{Ti} = \frac{V_{Paschen.mod}}{V_{mes}} = a\delta^b \quad \text{II.41}$$

Afin d'établir une relation entre ces deux variables et la température, les valeurs extraites de a et b sont tracées en fonction de la température.

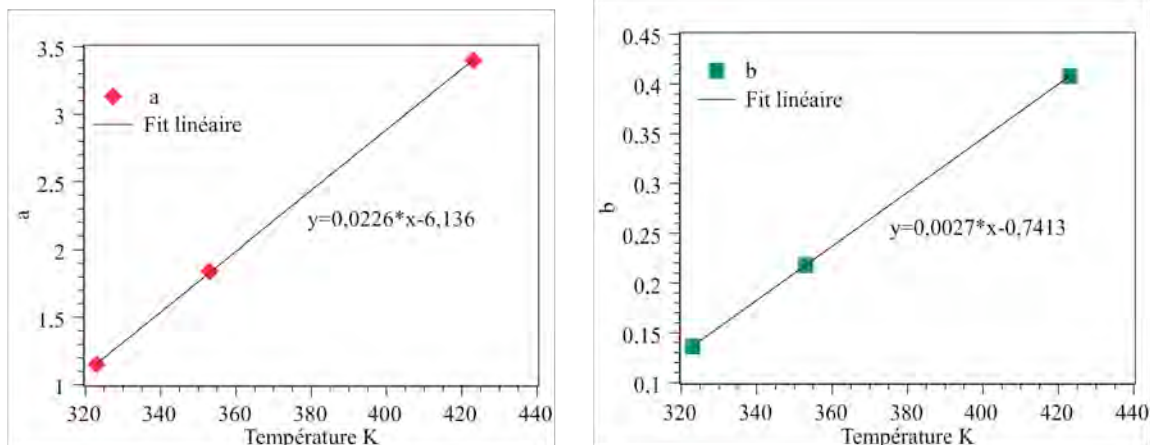


Figure II.36 Valeurs de a et b en fonction de la température

Nous pouvons remarquer d'après la Figure II.36, que ces deux variables a et b varient linéairement avec la température, selon les deux expressions suivantes :

$$a = 0,0226 \cdot T_i \text{ (K)} - 6,13 \quad \text{II.42}$$

$$b = 0,0027 \cdot T_i \text{ (K)} - 0,74 \quad \text{II.43}$$

En introduisant le facteur K_{T_i} dans l'expression modifiée de Paschen, la nouvelle expression empirique de la tension du claquage pour des variations combinées de température (T_i) et de pression devient :

$$V_{T_i} = \frac{V_{Paschen. \text{ mod}}}{K_{T_i}} \quad \text{II.44}$$

Afin de vérifier la validité de cette expression, une comparaison entre les valeurs mesurées et celles calculées par l'équation (II.44) pour des températures de 100 et 125 °C a été réalisée.

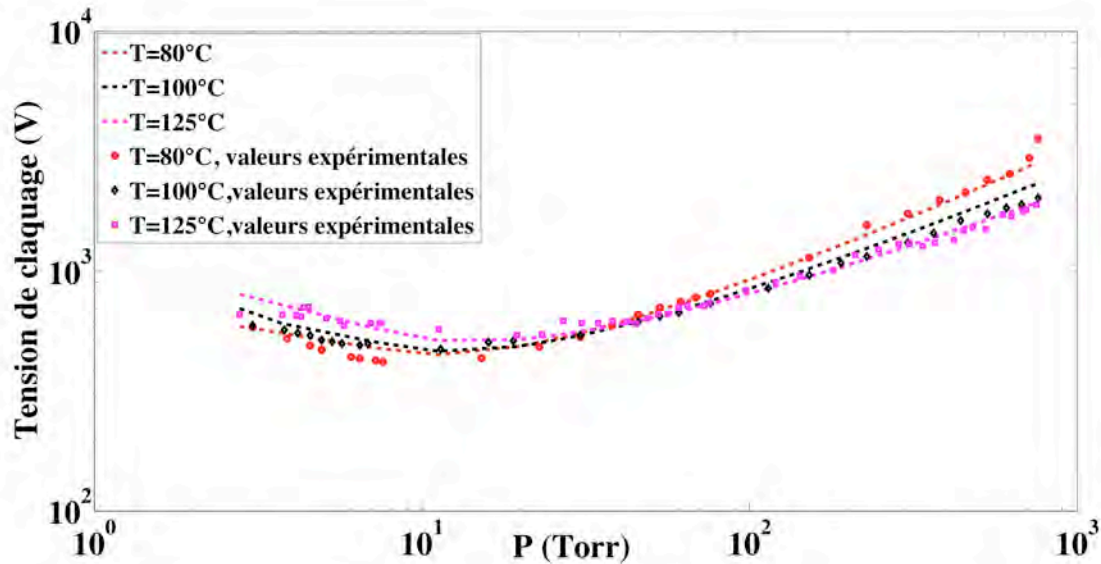


Figure II.37 Comparaison entre les points expérimentaux et les courbes simulées

Sur la Figure II.37, une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales obtenues et les courbes correspondantes simulées est observée.

Néanmoins, pour des températures inférieures à 35°C, les points expérimentaux ne suivent plus le comportement de la courbe simulée et par conséquent cette formule n'est plus applicable ; la correction proposée trouve ici la limite de son utilisation.

La plupart des expériences sont effectuées en fixant une distance interélectrodes de 1mm ; aussi est il nécessaire de considérer plusieurs distances afin de vérifier la validité de la formule quelle que soit la largeur du gap. Sur la Figure II.38 nous présentons par exemple les points obtenus en faisant varier la pression pour une température de 80°C et une distance

interélectrodes de 400 μ m. Il est clair que les points expérimentaux coïncident bien avec la courbe simulée. A noter que ce même résultat est obtenu pour d'autres distances interélectrodes non représentées ici.

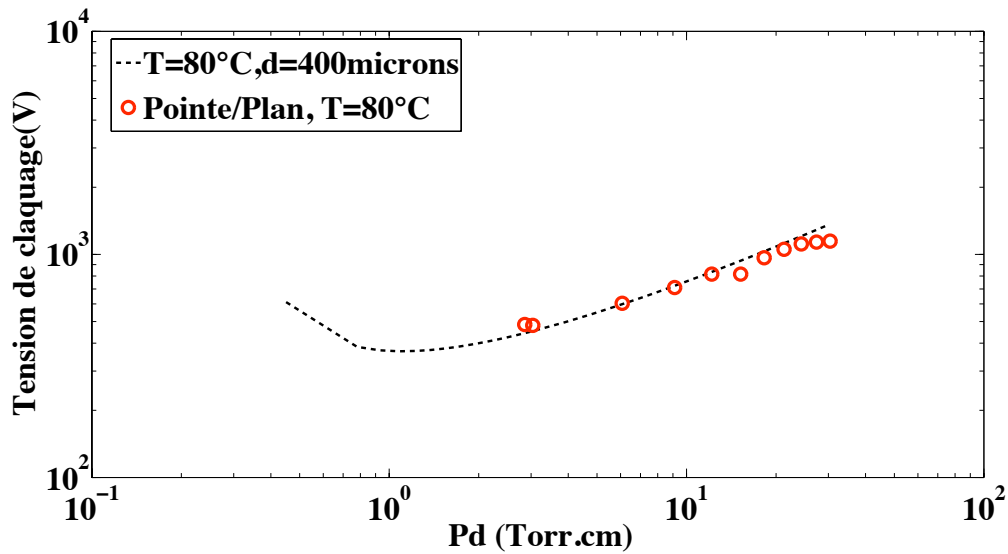


Figure II.38 Comparaison entre les points expérimentaux et les courbes simulées, $T=80^\circ\text{C}$, $d=400\mu\text{m}$.

II.2.3.3.2 Courbes simulées par la nouvelle formule empirique

En conclusion cette formule est validée pour des températures supérieures à 35°C et pour toutes distances interélectrodes. La variation de la tension de claquage, déduite de l'expression (II.44), en fonction de la pression pour différentes températures et pour une distance interélectrodes de 1 mm, est présentée sur la Figure II.39.

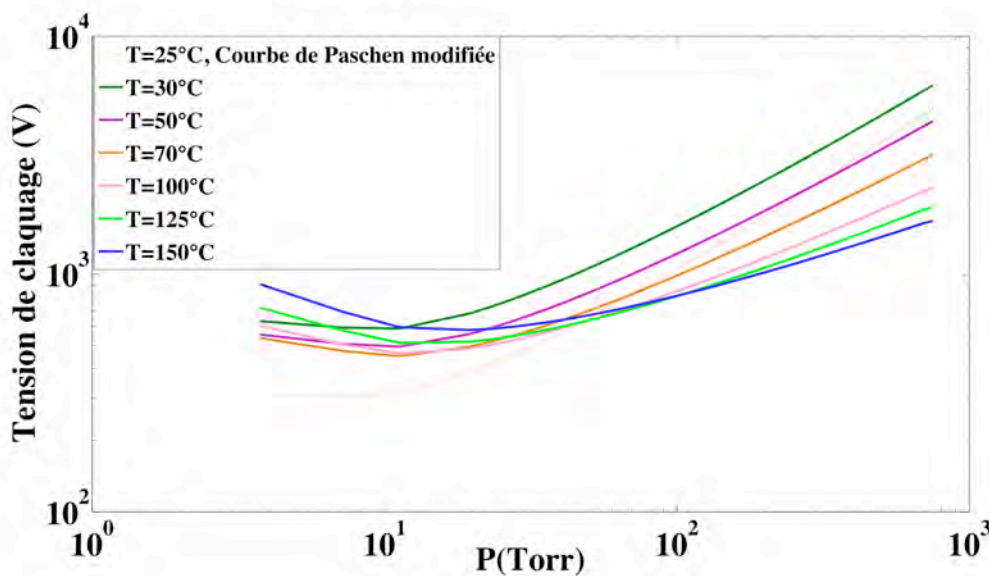


Figure II.39 Courbes simulées de la variation de la tension de claquage en fonction de la pression sous différentes températures.

On peut en déduire de plus, le champ réduit pour différentes températures en fonction de la pression. La Figure II.40 présente la variation du champ réduit en fonction de la pression pour différentes valeurs de température et pour une distance interélectrodes de 1mm.

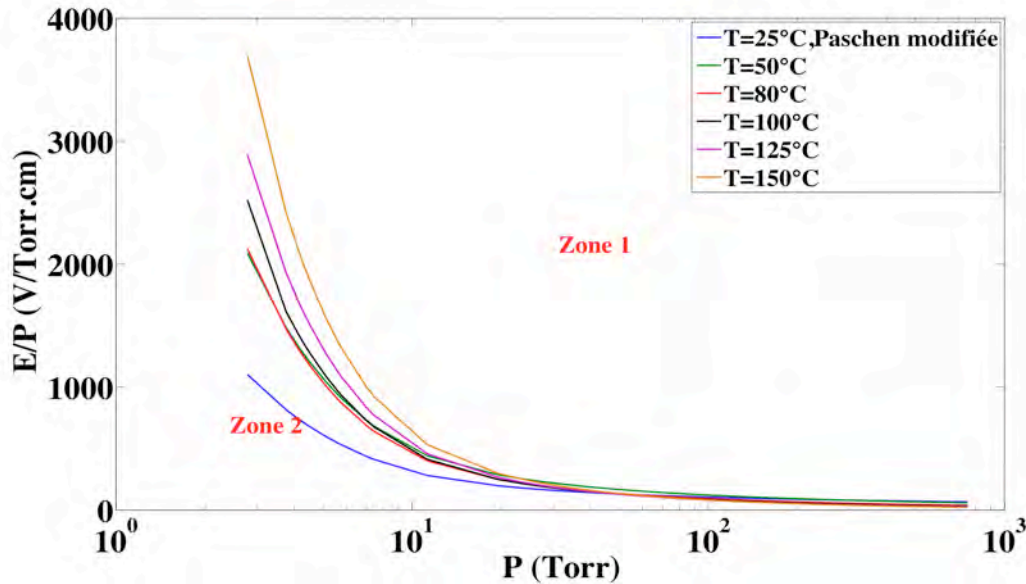


Figure II.40 Courbes simulées du champ électrique réduit.

Selon le dimensionnement du système et les critères de fonctionnement (niveau de tension, géométrie des électrodes et environnement du système), pour une valeur de champ réduit, à une température donnée, se situant dans la zone 2, le système est exempt de décharges et la zone 2 peut être qualifiée de zone de fiabilité. A l'inverse, les valeurs de champ réduit de la zone 1 vont engendrer des décharges.

De plus, nous remarquons d'après cette figure que pour des faibles valeurs de pression ($p < p_{min}$), plus la température augmente la zone de fiabilité devient grande. Ce comportement peut être expliqué en se référant à la Figure II.39 qui représente la variation de la tension de claquage sous des conditions combinées, où pour des faibles valeurs de pression une augmentation de la tension en fonction de l'augmentation de la température est observée. Par conséquent, nous pouvons conclure qu'un SIE installé dans des zones non pressurisées et exposé à des températures plus élevées sera moins contraint que celui installé dans des zones pressurisées et exposé à des températures élevées.

II.2.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons exploité l'influence des paramètres atmosphériques sur la tension d'apparition des décharges, sur l'énergie dissipée ainsi que sur la courbe théorique de Paschen.

La validité des expressions correctives introduites à la loi de Paschen a été étudiée. A la pression atmosphérique, la correction de Peek est validée pour des températures inférieures à 25°C, alors que la correction de Dunbar est validée pour des températures supérieures à 25°C. En revanche, si une variation supplémentaire de pression est introduite, la correction de Dunbar n'est plus valide. En se basant sur nos résultats expérimentaux, une nouvelle formule empirique pour le calcul de la tension de claquage sous conditions combinées, a été proposée et validée pour des températures supérieures à 35°C.

De plus, en faisant varier la pression, deux mécanismes de claquage ont été identifiés à gauche du minimum de Paschen suivant la valeur de la température. Pour des faibles températures, le mécanisme de claquage mis en jeu est *gaz mechanism*, alors que pour des températures élevées le mécanisme responsable du développement de la décharge est *vacuum mechanism*.

De cette étude et connaissant les conditions environnementales de travail d'un équipement électrique, nous pouvons en déduire la tension d'apparition des décharges ainsi que les mécanismes responsables de leur développement.

CHAPITRE III. DECHARGES PARTIELLES : ETAT DE L'ART

Chapitre III Décharges Partielles : Etat de l'art

Des décharges partielles (DP) peuvent prendre naissance dans les défauts qui se trouvent dans les matériaux isolants des systèmes d'isolation électrique (SIE). En effet, ces matériaux isolants utilisés ne sont jamais parfaitement homogènes. D'une part, au cours de leur élaboration, de très faibles quantités de gaz peuvent se trouver souvent emprisonnées au sein du matériau et forment des vacuoles de formes et de dimensions très diverses et dont l'accès aux caractéristiques (dimension, pression, nature du gaz) est impossible. D'autre part, lors de la mise en place de l'isolant autour de pièces conductrices, ou encore sous l'action de contraintes thermiques ou mécaniques, des décollements se manifestent entre le diélectrique solide et le conducteur électrique. Ces occlusions peuvent être le siège de décharges partielles. D'autres types de défauts peuvent être à l'origine des DP tels que ceux qui sont créés par les contraintes dues aux manipulations pendant la phase d'installation, ou des effets de pointe liés au passage à proximité d'un plan de masse ou d'une arête.

Notre étude porte sur les décharges partielles qui sont générées dans ces types de défauts, plus particulièrement celles qui apparaissent entre la partie isolante et la partie conductrice des SIE ou bien dans le gap séparant un câble passant à côté d'un plan de masse. Ces phénomènes peuvent être représentés par deux électrodes (pointe/plan) séparées par un gap d'air, et où l'une des deux est couverte par un diélectrique. Dès lors, et comme son nom l'indique, la décharge qui se développe dans le gap est connue sous le nom « décharge à barrière diélectrique » ou DBD. Nous commencerons par définir plus précisément une DBD, et dans une deuxième partie, nous présenterons un état de l'art relatif aux décharges partielles. Nous nous attarderons plus précisément sur les différents types de décharges partielles ainsi que sur les méthodes de détections utilisées. Nous finirons par une description du dispositif expérimental utilisé pour l'identification de la nature des défauts et pour la mesure du nombre et de l'intensité de décharges.

III.1 Décharge à barrière diélectrique

Une décharge à barrière diélectrique est une décharge qui se produit entre deux électrodes métalliques séparées par un intervalle de gaz et par un diélectrique. Le diélectrique peut constituer lui-même une électrode, ou les deux, ou être situé entre ces deux électrodes. L'intérêt du diélectrique est qu'il limite le courant et évite le passage à l'arc qui est très probable à la pression atmosphérique dans une décharge entre électrodes planes. Les DBD trouvent un immense champ d'application (traitement de surface, ozoneur,...) et de ce fait, font l'objet de travaux de recherche conséquents depuis de nombreuses années et que l'on peut trouver par exemple dans [KOG03] [LAZ05] [KOG04] [FRI05]. En particulier, l'existence d'un régime de décharge à barrière diélectrique homogène à la pression atmosphérique est découverte en 1988 grâce aux recherches des japonais Kanazawa *et al*

[KAN88], et de nombreux travaux se déroulent aujourd'hui dans l'équipe MPP du LAPLACE.

III.1.1 Principe et exemples de configuration

La barrière diélectrique impose une alimentation alternative, généralement sinusoïdale, pour un fonctionnement en régime permanent d'un tel dispositif. Après application d'une tension sinusoïdale suffisante, c'est à dire si la tension sur l'intervalle de gaz est supérieure à la tension de claquage, une décharge s'amorce. Ce type de décharge est différent de celui généré entre deux électrodes métalliques. En effet, il a été observé par exemple par **H.BERTIEN** [BER66] que si la décharge se produit entre deux parois conductrices, elle suit toujours une trajectoire unique et peut atteindre une énergie élevée ; au contraire, si l'une des parois est isolante, cette décharge est fragmentée en une pluie de décharges individuelles de faible énergie (ou effluves) qui dispersent la charge sur toute la surface. Cette fragmentation et cette dispersion révèlent que la décharge est amenée à s'éteindre presque aussitôt après son amorçage et pour délaisser sans cesse les chemins qu'elle suivait précédemment pour rechercher ailleurs un trajet plus favorable.

La figure III.1 montre plusieurs configurations de DBD qui conduisent soit à une décharge volumique (VD) soit à une décharge surfacique (SD).

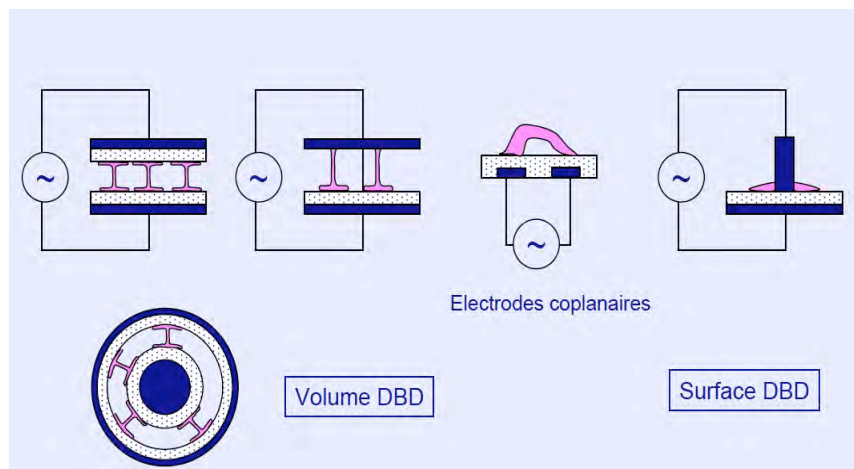


Figure III.1 Exemples de configurations d'une DBD

On peut souligner qu'il existe une différence significative entre les mécanismes à l'origine de ces deux types de décharges. Dans le cas de « VD », la charge est transférée à travers les canaux des microdécharges qui traversent le gap ; dès lors, en augmentant la tension appliquée, le nombre de ces microdécharges par période augmente. En revanche, pour la décharge surfacique « SD », le gap d'air est constitué par la surface même du diélectrique, et de ce fait une augmentation de la tension se traduit par un élargissement de la surface soumise aux décharges sur le diélectrique ; Dans ce cas, le transfert de charge aura lieu dans une couche mince sur la surface du diélectrique [GIB00].

III.1.2 Etablissement de la tension d'initiation de la décharge

La tension d'initiation d'une DBD est la tension appliquée entre les électrodes métalliques pour qu'une décharge se produise dans l'intervalle de gaz et constitué d'air dans notre cas. A cause de la présence de la paroi isolante, elle est supérieure à celle qu'elle serait sans ce diélectrique. Pour établir cette tension, on considère l'ensemble schématisé sur la Figure III.2a, c'est à dire un isolant d'épaisseur e_r et de permittivité ϵ_r en série avec une couche d'air d'épaisseur d_{air} . L'ensemble est soumis à une différence de potentiel V . Le circuit électrique équivalent de ce système est représenté sur la Figure III.2b.

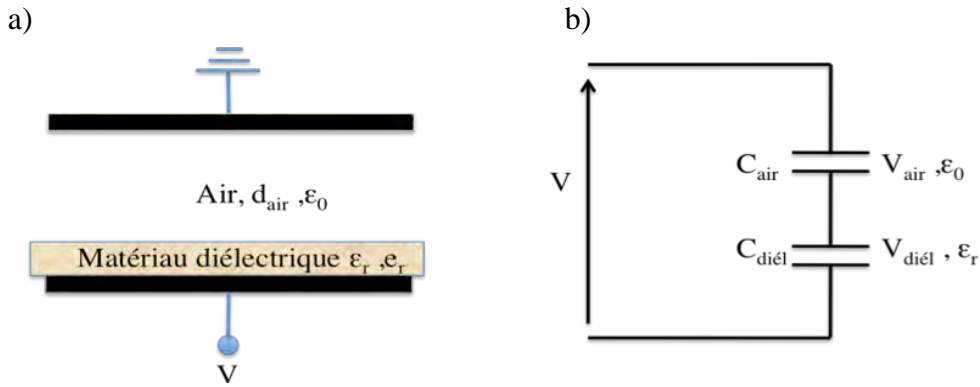


Figure III.2 a)Schématisation d'une DBD plane et son circuit électrique équivalent b).

En négligeant la conductivité des matériaux diélectriques, on peut considérer que l'interface isolant/air ne contient pas de charge, et que par conséquent les vecteurs de déplacements D_{air} et $D_{diél}$ sont identiques :

$$D_{air}=D_{diél} \Leftrightarrow E_{air}\epsilon_0=E_{diél}\epsilon_r \quad \text{III.1}$$

où ϵ_0 représente la permittivité du vide.

Par ailleurs, en négligeant l'inhomogénéité du champ électrique, la différence de potentiel entre les deux électrodes est :

$$V=V_{air}+V_{diél} \quad \text{III.2}$$

En introduisant (III.1) dans (III.2) on obtient la valeur des champs électriques dans l'air et dans le diélectrique en fonction de la tension appliquée [KUF00] :

$$E_{air} = \frac{V}{d_{air} + e_r \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right)} \quad \text{III.3}$$

$$E_{diél} = \frac{V}{\epsilon_r \left(\frac{d_{air}}{\epsilon_0} + \frac{e_r}{\epsilon_r} \right)} \quad \text{III.4}$$

La rigidité diélectrique de l'air étant évidemment plus faible que celle du diélectrique, le claquage s'opère avant tout dans cet espace.

On peut ainsi établir le lien entre la tension V appliquée au dispositif et V_{air} la tension appliquée sur l'intervalle d'air :

$$V = V_{air} \left(1 + \frac{\epsilon_r}{d_{air} \epsilon_r} \right) \quad \text{III.5}$$

V_{air} exprimant la tension de claquage de l'intervalle, qui faut-il le rappeler dépend des conditions atmosphériques, les travaux développés sur les décharges dans l'air et exposés dans le chapitre précédent trouvent donc ici pleinement leur justification.

Bien sûr, une démarche identique peut s'appliquer pour des géométries différentes. Plus complexes à mener que dans le cas d'une DBD planaire, elle conduit à un résultat similaire et nos conclusions du chapitre précédent conservent leur validité.

III.2 Etat de l'art : Décharges partielles

Le terme décharge partielle est défini par la norme IEC 60270 comme une décharge électrique localisée, qui ne traverse que partiellement un isolant compris entre deux électrodes [IEC98]. Les décharges partielles dans un diélectrique se produisent le plus souvent dans une cavité gazeuse contenue dans le volume de l'isolant: la permittivité du gaz étant très inférieure à celle du matériau environnant, un champ électrique beaucoup plus important que celui existant au sein de l'isolant apparaît. Si ce champ excède la rigidité diélectrique du gaz contenu dans la cavité, une décharge partielle a lieu.

Si le dispositif est alimenté en alternatif, les décharges successives vont progressivement détériorer l'isolant solide ou liquide, d'abord à la surface de la cavité, puis plus en profondeur, pouvant conduire finalement à un claquage aux bornes du diélectrique et à la destruction de l'installation. L'absence, ou la présence, de décharges partielles peut être contrôlée par des méthodes de détection, aussi bien pendant la fabrication que, sous certaines conditions, pendant la durée de vie de l'installation.

III.2.1 Classification des décharges partielles

Plusieurs classifications des DP ont été proposées, qui varient suivant le critère de sélection utilisé. Ainsi par exemple, Kreuger [KRE90] classe les décharges en fonction de leur localisation et définit ainsi quatre catégories (Figure III.3) :

- **Les décharges « internes »** qui apparaissent aux endroits où la rigidité diélectrique est faible, par exemple une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide ;

- **Les décharges « de surface »** qui sont des décharges prenant naissance au point « triple » métal /isolant/air lorsqu'y a un défaut (goutte d'eau, pollution, poussière..) et se développant en surface de l'isolant. Elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique ;
- **Les décharges « couronne »** qui prennent naissance dans le matériau aux endroits où le champ électrique est très renforcé (par exemple par un effet de pointe). La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe ;
- **Les arborescences dans les solides** : un “arbre électrique” prend naissance sur un défaut de l'isolation. Il y a ensuite croissance d'une structure ramifiée comprenant différentes branches qui sont le siège de décharges. Les arborescences constituent le phénomène de claquage à long terme. On peut les classer suivant 2 catégories :
 - Les arborescences électriques.
 - Les arborescences électrochimiques.

On distingue 3 phases dans l'évolution du phénomène d'arborescences :

- La phase d'initiation qui est la période qui sépare le début de l'application de la tension à l'apparition des premières arborescences.
- La phase de propagation qui est toujours accompagnée de décharges partielles.
- La phase de claquage qui se produit très rapidement lorsque les branches de l'arbre traversent complètement le mur isolant [AGU90].

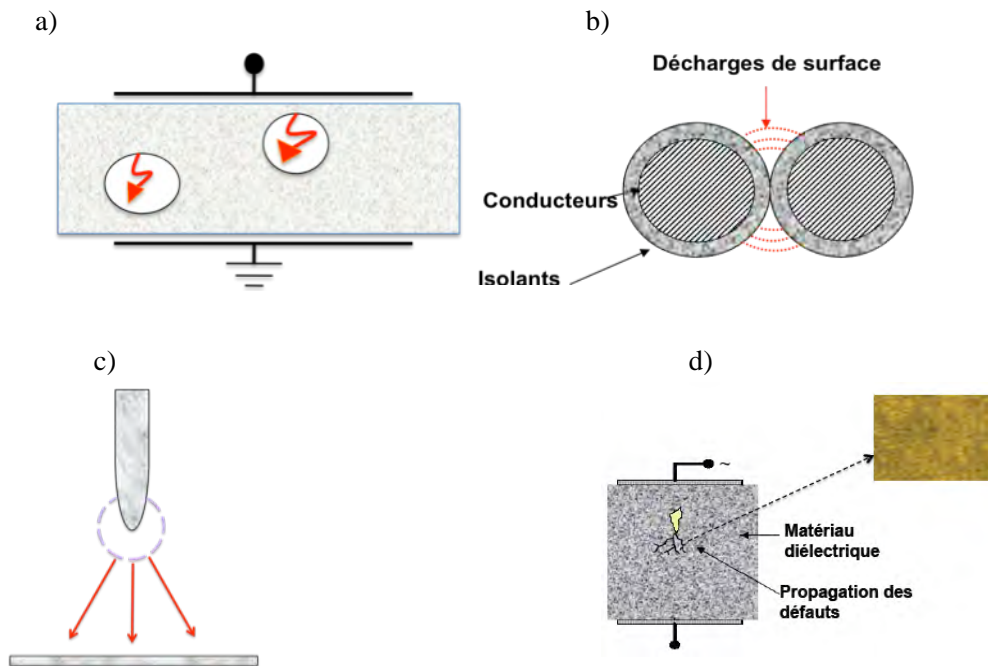


Figure III.3 Différents types de décharges selon Kreuger : a) interne, b) surface, c) couronne et d) en arborescence.

III.2.1.1 Conséquences des décharges partielles

Les décharges partielles conduisent à une dégradation des matériels sous l'action de diverses contraintes :

- Contrainte thermique générée localement par la décharge qui peut entraîner une carbonisation de l'isolant.
- Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (ozone, oxydes d'azote et acide nitrique notamment).
- Erosion mécanique due au bombardement par des espèces chargées et aux attaques acides.

Ces contraintes provoquent une dégradation du matériau isolant. Lorsque l'isolant est trop abîmé, un arc électrique complet se produit entre deux phases ou entre une phase et le neutre, on dit alors qu'il y a amorçage. En général, cet amorçage conduit à la destruction de l'équipement.

III.2.1.2 Caractérisation des décharges partielles

L'objet de ce paragraphe est de décrire brièvement les caractéristiques des deux principaux types de DP: les décharges dans une cavité et les décharges de type « couronne ».

III.2.1.2.1 Décharges dans une cavité

Le développement des DP sous tension alternative peut être décrit simplement en utilisant un schéma équivalent de capacités : la Figure III.4 présente une section transversale d'un diélectrique d'épaisseur d comportant une cavité de forme sphérique d'épaisseur t . La cavité est modélisée par la capacité C_c , la partie du diélectrique en série avec la cavité représentée par la capacité C_b ; alors que la capacité C_a représente la partie saine restante du diélectrique.

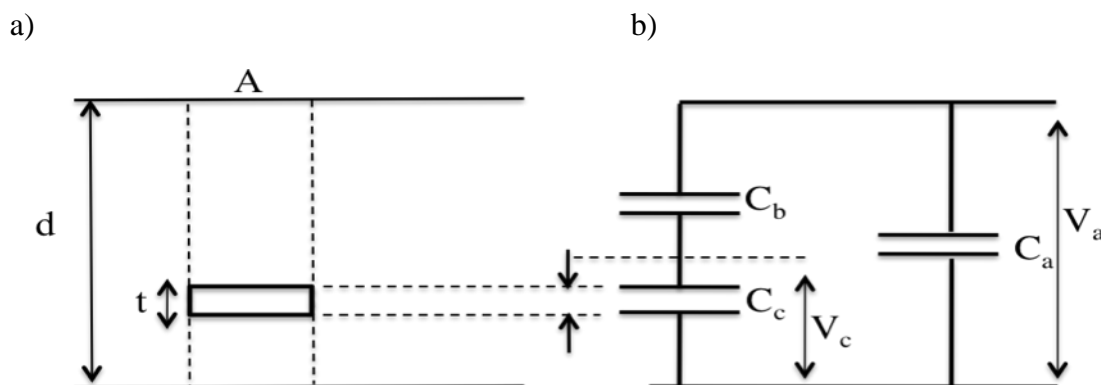


Figure III.4 Représentation schématique (a) et représentation équivalente (b) de type circuit de l'existence d'une décharge dans un isolant solide [KUF00].

En considérant $t \ll d$, et en supposant la cavité remplie de gaz, le champ aux bornes de la cavité C_c est alors exprimé par :

$$E_c = \epsilon_r C_c \quad \text{III.6}$$

La tension d'apparition de la décharge partielle (TADP) est atteinte lorsque le champ électrique dans la cavité atteint le champ disruptif de l'air.

La répartition des potentiels dans les différents éléments du circuit a déjà été décrite dans le paragraphe III.1.2.

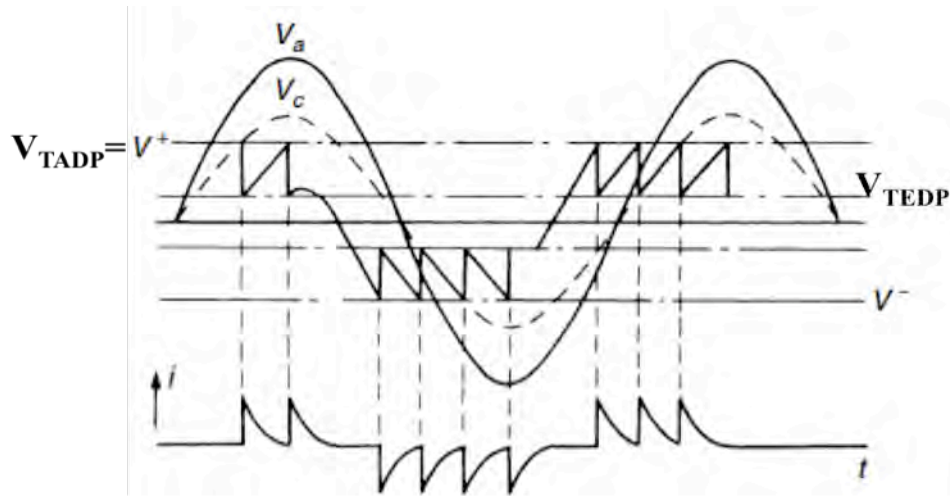


Figure III.5 Récurrence des DP dans une cavité sous tension alternative [KUF00].

V_a désigne la tension appliquée sur le diélectrique et V_c la tension aux bornes de la cavité (Figure III.5). Lorsque la tension dans la cavité (V_c) devient égale à une certaine valeur critique $V^+ = V_{TADP}$ (tension d'apparition des décharges partielles), une décharge partielle apparaît ; V_c chute alors à une valeur résiduelle V_{TEDP} (tension d'extinction des décharges partielles) et la décharge disparaît. Cette chute de tension se produit sur une durée très courte (quelque ns). Puis la tension aux bornes de la cavité augmente de nouveau et lorsque la tension arrive à nouveau à la valeur V^+ , une nouvelle décharge se produit. Ceci se répète jusqu'à ce que la haute tension V_a n'augmente plus, c'est à dire au sommet de l'alternance. Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative. Les décharges dans la cavité produisent des impulsions de courant rapides (durée de quelques ns) dans l'échantillon et dans le circuit extérieur (Figure III.5).

Le nombre de décharges par cycles de fonctionnement est élevé. On peut montrer qu'il est donné par la relation:

$$N = 4f \left(\frac{V_a - V_{TADP}}{V_{TADP} - V_{TEDP}} \right) \quad \text{III.7}$$

avec f la fréquence.

Notons aussi que les fréquences prévues pour la nouvelle génération d'avions « plus électriques » (fréquence variable de 400-800Hz), bien que n'ayant a priori pas d'influence sur le seuil d'apparition des DP, auront des conséquences sur le nombre de décharges par seconde et par suite sur la durée de vie du système dans le cas où les systèmes utilisés présentent des seuils inférieurs à la contrainte électrique.

III.2.1.2.2 Décharges couronnes

Comme indiqué précédemment, les décharges couronnes apparaissent dans les configurations géométriques qui induisent un renforcement local du champ électrique, comme par exemple une configuration pointe-plan. Par une démarche similaire à celle décrite précédemment pour les DP en volume, le développement des décharges couronnes peut être approximativement décrit en utilisant le circuit équivalent de la Figure III.6. Lorsque la tension appliquée V_a dépasse une certaine valeur critique U^+ (seuil de décharge), l'ionisation se produit et le phénomène de décharge couronne se manifeste. Ceci se répète jusqu'à ce que la tension appliquée V_a devienne inférieure au seuil de décharge U^+ (Figure III.6b). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative.

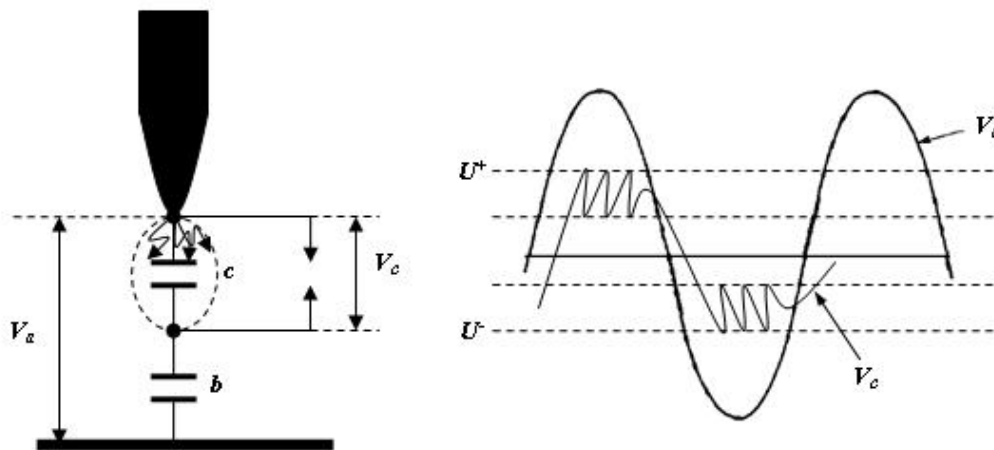


Figure III.6 a) Circuit équivalent et b) récurrence des décharges couronnes [KRE90].

III.2.2 Méthodes de détection des décharges partielles

Les déplacements de charge consécutifs à une décharge partielle et les courants correspondants sont de très faible durée et visuellement sur un oscilloscope ressemblent à une série d'impulsions apparemment aléatoires, faciles à confondre avec un bruit blanc ; une méthode de détection de DP, dite méthode électrique, voit son principe basé sur la mesure du courant de la décharge. Pour cela, on utilise un filtre passe-haut ou passe-bande de faible facteur de qualité, par exemple un circuit RLC parallèle, qui tend à atténuer le fondamental de la tension et à amplifier les phénomènes rapides provoqués par une décharge partielle.

Cependant, les décharges partielles sont souvent accompagnées d'une émission de son, de lumière, d'énergie et de réactions chimiques. Il est donc possible de détecter ces décharges partielles par d'autres méthodes dont nous citons :

III.2.2.1 Détection ultrasonore

Cette méthode est basée sur la détection à l'aide d'un capteur acoustique (microphones ultrasons) de la pression de l'onde de choc formée par l'activité de décharge partielle à l'intérieur de l'isolant. Les signaux sont ensuite convertis en son audible [ARD06].

En fonctionnement la plupart des équipements industriels génèrent un spectre large bande couvrant aussi bien le domaine audible que celui des ultrasons. La composante ultrasonore de ces bruits possède une petite longueur d'onde extrêmement directionnelle. Cette caractéristique permet aux défauts ultrasonores émis d'être facilement localisables.

Cette méthode permet de mesurer l'énergie de la décharge qui est proportionnelle au carré de l'intensité des signaux captés [LUN92].

III.2.2.2 Détection radio

La méthode de mesure de courant radiofréquence, est basée sur l'utilisation d'un transducteur de courant de radiofréquence dans le domaine 2.5kHz-200kHz. Les ondes électromagnétiques générées par une décharge sont captées par un récepteur à l'aide d'une antenne [ARD06]. Cette méthode ne permet pas de localiser ou d'avoir des informations quantitatives sur la décharge partielle [SEL95].

III.2.2.3 Détection optique

La technique optique a plusieurs avantages car elle est beaucoup plus sensible que les techniques de détection conventionnelles et elle permet aussi la détection des décharges partielles sous des régimes de tension transitoires pour lesquels les mesures des décharges partielles sont extrêmement difficiles [SEB]. La lumière émise par les décharges partielles produit une image qui est enregistrée par une caméra CCD intensifiée à gain variable. Cette méthode permet de localiser les décharges avec précision, mais la corrélation entre l'amplitude de la décharge et l'intensité lumineuse est difficile à établir d'où la nécessité d'utiliser un photomultiplicateur [CAL08].

III.2.2.4 Détection électrique

De nombreuses mises au point sur les techniques de détection et de mesure des décharges ont été publiées. On citera celles de Kreuger [KRE89], Bartnikas [BBAR93] [BAR79] et Nattras [NAT88]. Des avancées notables ont été enregistrées et ne cessent d'améliorer l'analyse des

DP par un traitement numérique des données de décharges.

Les montages actuellement utilisés sont dérivés du dispositif mis au point par Austen et Whitehead en 1941 [AUS41]. Il existe deux types de circuit de mesure, soit indirect, soit direct. Dans un circuit indirect (Figure III.7a), l'impédance de mesure Z_m est en parallèle avec l'échantillon sous test. Dans un circuit direct (Figure III.7b), l'impédance de mesure Z_m est en série avec cet échantillon.

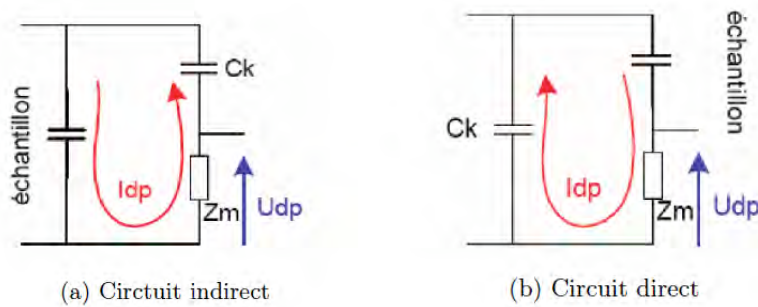


Figure III.7 Schéma des deux types de circuit de mesure indirect a) et direct b) des décharges.

La détection directe étant la plus couramment utilisée, nous allons en décrire le fonctionnement un peu plus précisément (Figure III.8).

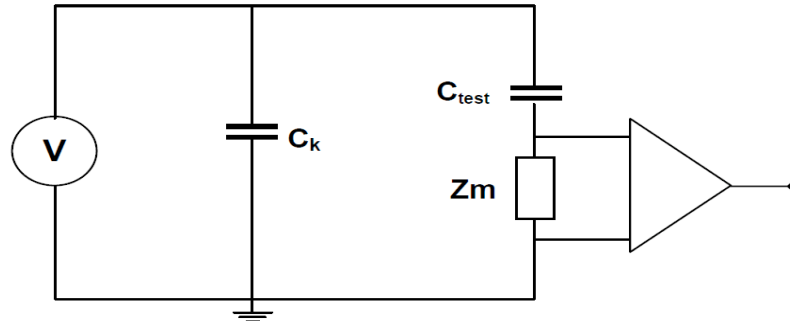


Figure III.8 Schéma de principe de la détection directe des DP.

Le dispositif sous test (D.U.T) représenté ici par sa capacité (C_{test}) est connecté en série avec une impédance de mesure Z_m . Le condensateur de couplage C_k est un élément important du circuit : c'est un condensateur haute tension exempt de décharges qui fournit la tension de manière transitoire à la cellule sous test. La durée des DP étant de typiquement quelques ns, son inductance parasite doit être nécessairement très faible et sa capacité importante. Lorsqu'une décharge se produit, un courant transitoire de quelques ns circule dans le circuit extérieur, qui correspond à une quantité de charge appelée charge apparente et détaillée dans un paragraphe suivant. Cette impulsion de courant est mesurée à l'aide de l'impédance de mesure Z_m , souvent composée d'un circuit RLC parallèle. L'inductance L atténue fortement les composantes basses fréquences du signal mesuré, la capacité C intègre les impulsions rapides de DP, et la résistance R amortit les oscillations de tension à ses bornes. Le signal est

ensuite amplifié puis visualisé sur un appareil de mesure (par exemple « l'ICM system » disponible au LAPLACE ou un oscilloscope). Après calibration, ce circuit permet de mesurer un signal proportionnel à la charge apparente des DP.

Un des paramètres essentiels d'un tel montage est la bande passante de l'impédance de mesure. Boggs et All [BOG82] ont travaillé sur la classification des détecteurs :

- Détection de décharge à large bande : c'est un instrument dans lequel la largeur de bande est comparable à la fréquence moyenne de la bande et ayant une bande passante de 100kHz centrée sur 200 ou 300 kHz
- Détection à bande étroite : c'est un instrument dans lequel la largeur de bande est petite par rapport à la fréquence moyenne de la bande et ayant une bande passante de 10 kHz centrée sur 20 ou 30 kHz.
- Détection à ultra bande : dont la largeur de bande est égale 100 kHz et centrée sur 1 GHz

Si elle est simple à mettre en œuvre, la méthode de mesure directe comporte l'inconvénient majeur d'être très sensible aux perturbations électriques provenant aussi bien du réseau d'alimentation que de l'environnement de l'appareillage. En conséquence de telles mesures ne peuvent être effectuées valablement que dans des cages blindées munies de filtre d'alimentation [AGU90].

III.2.2.5 La calibration de la mesure de charge des DP

Exprimée en *picocoulombs*, elle consiste à injecter aux bornes de la cellule d'essai, des impulsions de courant brèves et de charge connue. Le niveau de calibration permet d'apprécier la sensibilité de la mesure. Il dépend de la configuration de l'échantillon sous test. Le calibrage de l'appareil de mesure étant fonction des paramètres diélectriques de l'objet, il faut nécessairement opérer cette calibration à chaque changement d'objet.

III.2.3 Les grandeurs liées aux DP

III.2.3.1 Tension d'apparition et d'extinction des décharges partielles

Lorsqu'une tension V suffisante est atteinte aux bornes du diélectrique une décharge disruptive apparaît dans la cavité et le diélectrique perd ses propriétés isolantes. Cette tension est la tension d'apparition de décharge partielle « TADP ».

La tension d'extinction des décharges partielles est définie comme étant la tension pour laquelle ces décharges disparaissent. Elle est mesurée en diminuant la tension appliquée

graduellement à partir d'une tension où l'on observe une récurrence de décharges jusqu'à une tension où ils disparaissent. Cette tension est la « TEDP ».

III.2.3.2 Charge apparente

La variation de charge entraînée par une décharge partielle n'est, en général, pas directement mesurable. On utilise donc *la charge apparente* (q) qui est déduite de la variation de tension qu'entraîne, aux bornes de l'installation, la présence d'une décharge partielle [WET89].

Considérons une source de tension V alimentant une éprouvette constituée par deux armatures planes parallèles séparées par un gaz (Figure III.9).

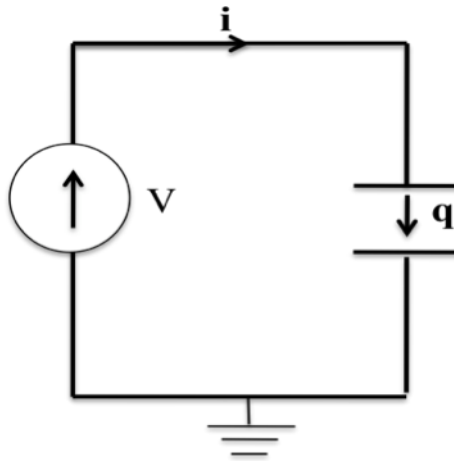


Figure III.9 Circulation d'une charge dans un gaz entre deux armatures planes

Le travail de la charge q traversant une distance dx sous l'effet d'un champ électrique est fourni par la source :

$$W = q \overrightarrow{E} \cdot d\vec{x} = iVdt \quad \text{III.8}$$

$$\text{Avec } \vec{E} = E\vec{u} \text{ et } d\vec{x} = dx\vec{u}, \|\vec{u}\| = 1 \quad \text{III.9}$$

$$\text{Soit alors } i = \frac{qEdx}{Vdt} = q \frac{Ev}{V} \quad \text{III.10}$$

v étant la vitesse de déplacement de la charge q dans la direction du champ électrique \vec{E} .

Si à un déplacement dx dans la direction du champ \vec{E} correspond une chute de tension ΔV , la charge apparente q_{app} qui circule dans le circuit interne sera donnée par :

$$q_{app} = \int_0^{\Delta t} i dt = \frac{q}{V} \int_0^{\Delta x} E dx \quad \text{III.11}$$

Soit alors :

$$q_{app} = q \frac{\Delta V}{V} \quad \text{III.12}$$

Il apparaît ainsi clairement que la charge apparente est une fraction de charge réelle libérée par la décharge.

III.2.4 Techniques d'analyse des DP

III.2.4.1 Procédures

L'exploitation des résultats de mesures des DP est délicate et nécessite le choix judicieux des techniques de reconnaissance. Elle se fait à l'aide de diagrammes de décharges tels que la distribution dans la phase du nombre (n) de décharges, de la charge moyenne ou les distributions n (q). Le traitement initial consiste à regrouper les impulsions de décharge en fonction de leur position par rapport à la phase de la tension : L'onde sinusoïdale est divisée en plusieurs fenêtres de phase (*phase window*) 4000 ou 8000 (voir Figure III.10) et pour chaque fenêtre de phase, l'intensité ainsi que le nombre de décharges sont enregistrés pendant un grand nombre de périodes.

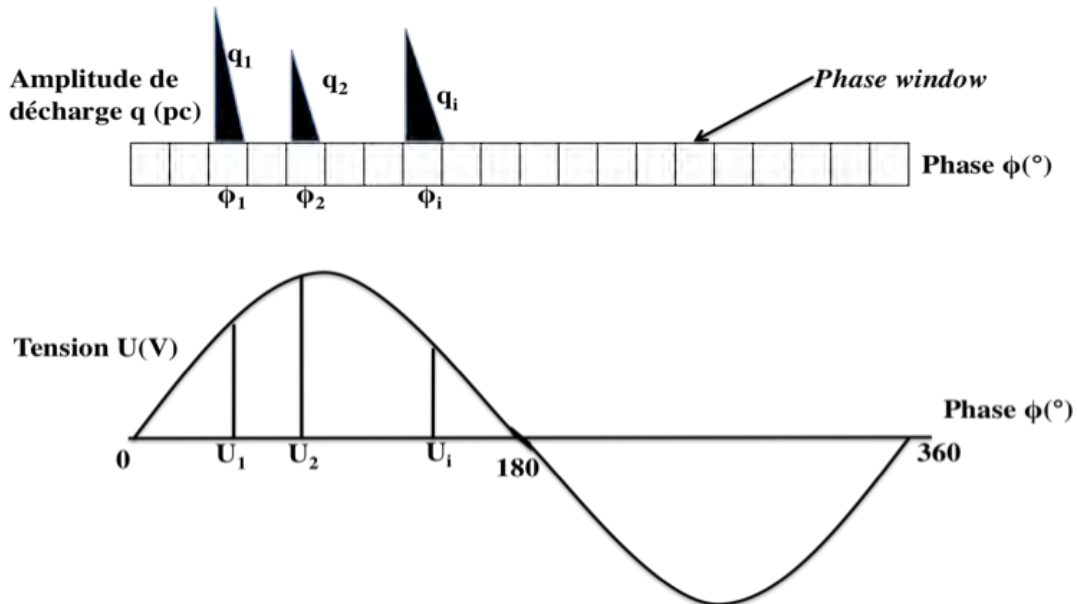


Figure III.10 Méthode de détection de la décharge : « *phase resolved discharge détection* ». Chaque décharge est représentée par son intensité q_i , son angle de phase ϕ_i et sa tension d'apparition U_i [GUL92].

En utilisant cette méthode de détection conventionnelle, l'activité électrique d'une DP est représentée par 3 quantités indépendantes :

- L'amplitude de la décharge q_i
- La tension d'initiation U_i
- La position de la décharge par rapport à l'angle de phase φ_i

En enregistrant ces grandeurs pendant un certain temps (quelques minutes), on peut en déduire les distributions statistiques suivantes :

- $H_{qn}(\Phi)$: L'amplitude moyenne des décharges dans chaque fenêtre en fonction de l'angle de phase
- $H_n(\Phi)$: Le nombre de décharges dans chaque fenêtre en fonction de l'angle de phase
- $H_{qmax}(\Phi)$: L'amplitude maximale de décharges dans chaque fenêtre en fonction de l'angle de phase

Sur un cycle de tension, ces trois quantités sont caractérisées par 2 distributions chacune (une appartenant à l'alternance positive et l'autre à l'alternance négative) :

- $H_{qn}(\Phi)$: $H_{qn}^-(\Phi)$ et $H_{qn}^+(\Phi)$
- $H_n(\Phi)$: $H_n^-(\Phi)$ et $H_n^+(\Phi)$
- $H_{qmax}(\Phi)$: $H_{qmax}^+(\Phi)$ et $H_{qmax}^-(\Phi)$

La différence entre ces distributions présente une méthode de reconnaissance de la nature des défauts par les étapes suivantes :

- La mesure du niveau de tension TADP
- L'acquisition des diagrammes de décharges (signatures des DP)
- La comparaison des signatures obtenues à celles relatives à des défauts connus (utilisation de la base de données)
- La classification.

Un exemple type de signature est la représentation de la signature de DP sur une base de temps alternatif qui permet d'identifier et/ou de localiser la décharge :

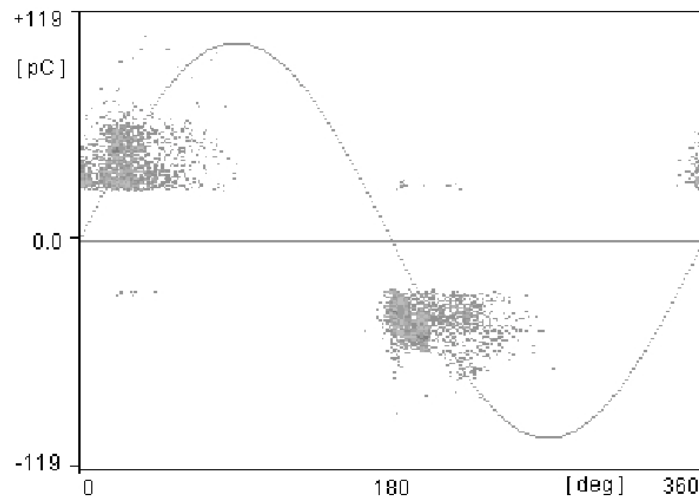


Figure III.11 Exemple d'acquisition de signature de DP en alternatif [LEB06]

Par exemple, d'après ce diagramme de décharge, caractérisé par des formes de décharges quasi symétriques entre l'alternance positive et négative, on peut en déduire que la décharge est générée dans une cavité à l'intérieur de l'isolant.

En 1978 Tanaka *et al* [TAN78] ont introduit des opérateurs statistiques pour étudier la différence entre ces distributions. Il s'agit du calcul des coefficients statistiques permettant de décrire la forme de la distribution des décharges. Ces auteurs introduisent les moments d'ordre 3 et 4 (*Skewness* et *Kurtosis*) des distributions des décharges et étudient la variation de ces coefficients en fonction de la tension appliquée et de la configuration des électrodes pour divers types de cavités. Ils obtiennent une corrélation entre la nature du défaut et l'évolution de ces coefficients [TAN80].

III.2.4.2 Opérateurs statistiques : Skewness et Kurtosis

III.2.4.2.1 Définition

Le Skewness et le kurtosis sont deux paramètres statistiques permettant de mesurer respectivement l'asymétrie (autour du paramètre de centrage) et l'aplatissement de la distribution des valeurs (ou à l'inverse, l'aspect 'pointu'). Ce sont deux paramètres simples qui permettent de comparer empiriquement la distribution d'une propriété avec celle d'une distribution suivant une loi normale [GUL91] [OKA86].

Moment d'ordre 3 ou Skewness (symétrie)

Le Skewness – en français 'dissymétrie' ou 'asymétrie' (ISI, 2007) – mesure le degré d'asymétrie de la distribution par rapport à sa moyenne

$$S_k = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 P_i}{\sigma^3} \quad \text{III.13}$$

avec x_i : valeurs discrètes

P_i : probabilité de l'apparition de x_i dans la i -th *phase window*

μ : la valeur moyenne de la distribution :

$$\mu = \sum x_i P_i \quad \text{III.14}$$

σ : la variance de la distribution

$$\sigma^2 = \sum (x_i - \mu)^2 P_i \quad \text{III.15}$$

Si S_k est égal à 0, la distribution est symétrique. Si S_k est négatif, la distribution est asymétrique vers la gauche. Si S_k est positif, la distribution est asymétrique vers la droite.

Moment d'ordre 4 ou Kurtosis (aplatissement)

Le Kurtosis – en français ‘aplatissement’, ‘curtosie’ ou ‘excès’ – mesure le degré d’aplatissement d’une distribution par rapport à une distribution normale. Lorsqu’il est positif, cela indique que la distribution est "pointue". Lorsqu’il est négatif, cela indique que la distribution est relativement "écrasée".

$$K_u = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 P_i}{\sigma^4} \quad \text{III.16}$$

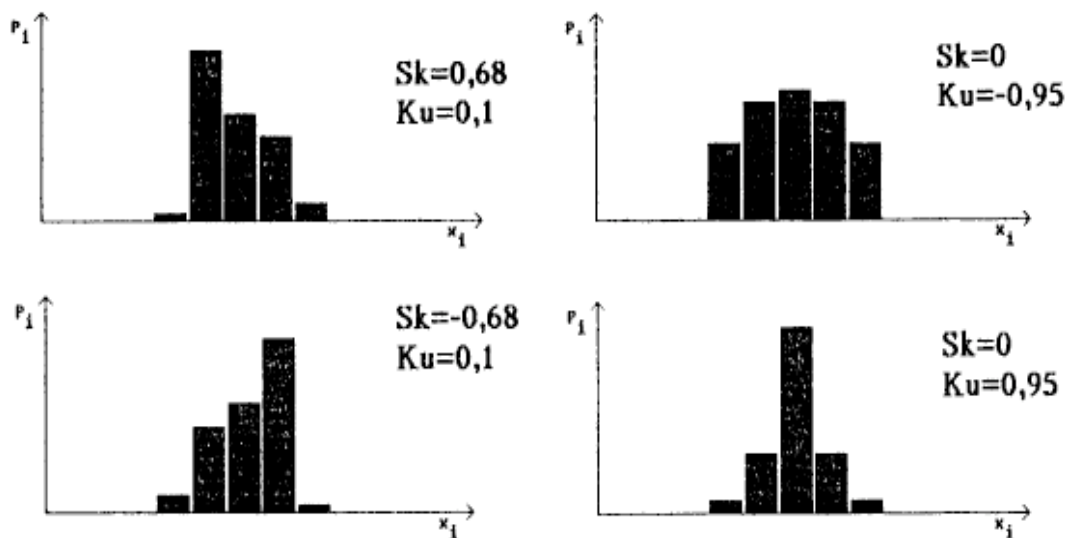


Figure III.12 Exemple typique de profils de distribution des DP et les valeurs de Skewness et Kurtosis

III.2.4.2.2 Applications aux analyses de la signature des DP

Les opérateurs statistiques sont utilisés d'une part comme méthode de classification des décharges partielles, et d'autre part comme indicateurs de vieillissement des matériaux isolants.

Okamoto et Tanaka [OKA86] étaient parmi les premiers à signaler un système de reconnaissance automatique des décharges en utilisant particulièrement Sk de H_{qn} . Ce paramètre statistique est un indicateur très sensible à la forme de la cavité où les décharges se développent.

En 1992 Gulski *et al* ont proposé une méthode automatique de reconnaissance des DP appliquée à des cavités cylindriques dans différents matériaux isolants [GUL92]. Leur étude est complétée en 1993 par une classification des DP générées dans des modèles de défauts standards élaborés en laboratoire ou sur des maquettes contenant des défauts connus ou encore sur des appareils électriques [KRE89][LUC01]. Ils utilisent les distributions $n(\varphi)$ et $q(\varphi)$.

Hozumi *et al* [HOZ92], Suzuki et Endoch [SUZ92] ont utilisé la différence entre la forme des distributions $H_n(\varphi, q)$ et $H_{qn}(\varphi)$ avant et après initiation d'une arborescence dans une cavité comme un indicateur de vieillissement.

En 1985, Tatsuki et Tanaka [TAT85] ont adopté Sk comme indicateur d'initiation d'une arborescence dans les isolants solides. Ils ont utilisé une méthode de suivi des Skewness avec une représentation dans le plan où l'axe des abscisses représente les Skewness des distributions positives et l'axe des ordonnées représente les Skewness des distributions négatives. Cette méthode a été employée en 2003 par C.yonghon *et al* [YON03] pour en détecter l'initiation d'une arborescence (Sk devient négative) dans des câbles XLPE.

De même l'opérateur statistique Ku est exploité en 2009 par Z.A.Tamus *et al* [TAM09] comme indicateur de vieillissement des câbles de polyéthylène. Ils ont démontré que le début de dégradation du matériau peut être détecté en mesurant les valeurs de Ku : dans les câbles neufs les valeurs de Ku sont élevées et évoluent rapidement, alors qu'en revanche dans des câbles vieillis ces valeurs deviennent faibles et relativement constantes.

III.3 Présentation du dispositif expérimental

Dans ce paragraphe, nous allons présenter le dispositif expérimental utilisé pour l'identification de la nature des défauts et pour la mesure du nombre et de l'intensité de décharges. Les résultats obtenus seront développés dans le chapitre suivant.

L'ensemble du système de mesure des DP est composé de plusieurs parties (voir Figure III.13) :

Source de tension variable

Un générateur de tension (alternative sinusoïdale), commandé manuellement permet d'appliquer une tension d'amplitude variable pour atteindre la tension de seuil d'apparition des DP. Il s'agit soit de l'association auto transformateur / transformateur, soit d'un générateur basse fréquence (GBF) alimentant un amplificateur de puissance. La valeur seuil observée dépend de nombreux paramètres : sensibilité de la mesure (perturbation par des signaux parasites), ainsi que de l'attention de l'opérateur.

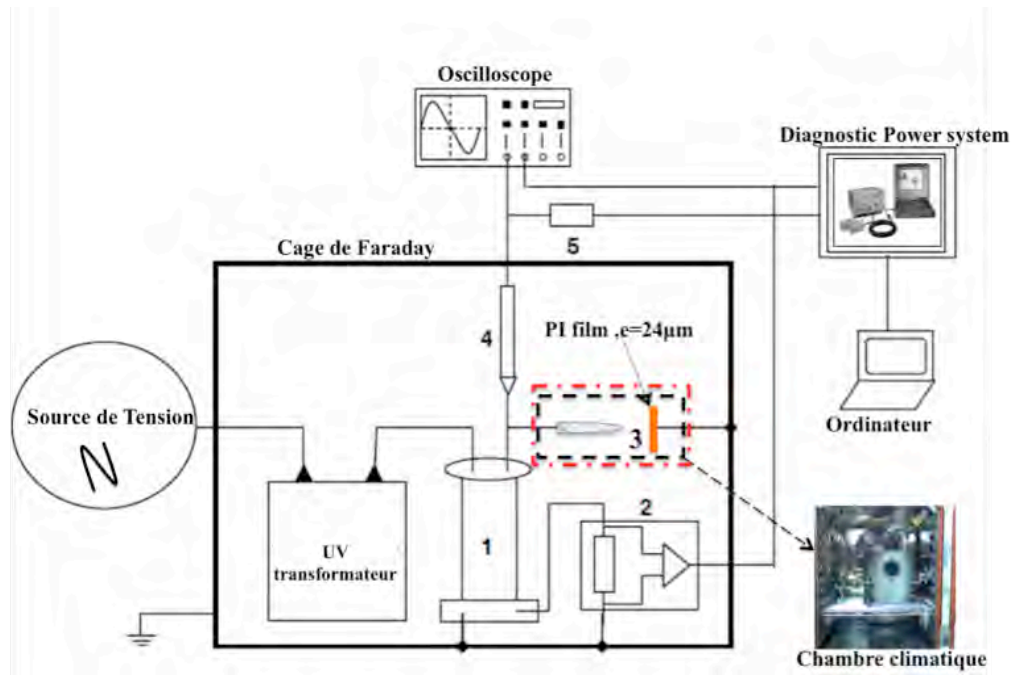
Le système de détection et de mesure électrique de DP

Le système utilisé est un *ICM system* de la société Power Diagnostix Systems GmbH [Annexe 3]. Grâce à ce système de mesure on peut en tirer l'intensité des décharges, leur nombre ainsi que la valeur du courant de décharge absolu, obtenue par intégration des valeurs de décharge « NQS ». Le logiciel de traitement associé contient toutes les fonctions nécessaires pour commander l'instrument, éditer les paramètres d'installation pour acquérir des données et visualiser les résultats. Il est couplé à un oscilloscope. La tension d'initiation V_i est mesurée avec l'un ou l'autre de ces dispositifs (Figure III.13).

La cellule test est déjà décrite dans le chapitre II.

L'ensemble du dispositif est placé dans une cage de Faraday. Cette précaution est essentielle pour limiter les perturbations et le bruit de fond électrique à une valeur très faible. Pour les mesures de décharges partielles sous contraintes environnementales (variations de température et de pression), une enceinte climatique (Vötsch) a été utilisée en remplacement de la cage de Faraday.

La mesure de DP est une mesure relative, qui dépend des valeurs des grandeurs électriques des composants du circuit. Avant chaque acquisition, une calibration de la mesure des décharges doit être réalisée en injectant aux bornes de la cellule d'étude une charge connue (1, 5, 10, 20, 50, ou 100pC, en fonction de la plage des valeurs attendues) délivrée par une unité de calibration (CAL1A).



- 1 – Capacité de couplage
- 2 – Impédance de mesure et amplification
- 3 – Echantillon sous test
- 4 – Sonde de tension
- 5- Boîtier de synchronisation de la tension

Figure III.13 Schéma synoptique du dispositif expérimental

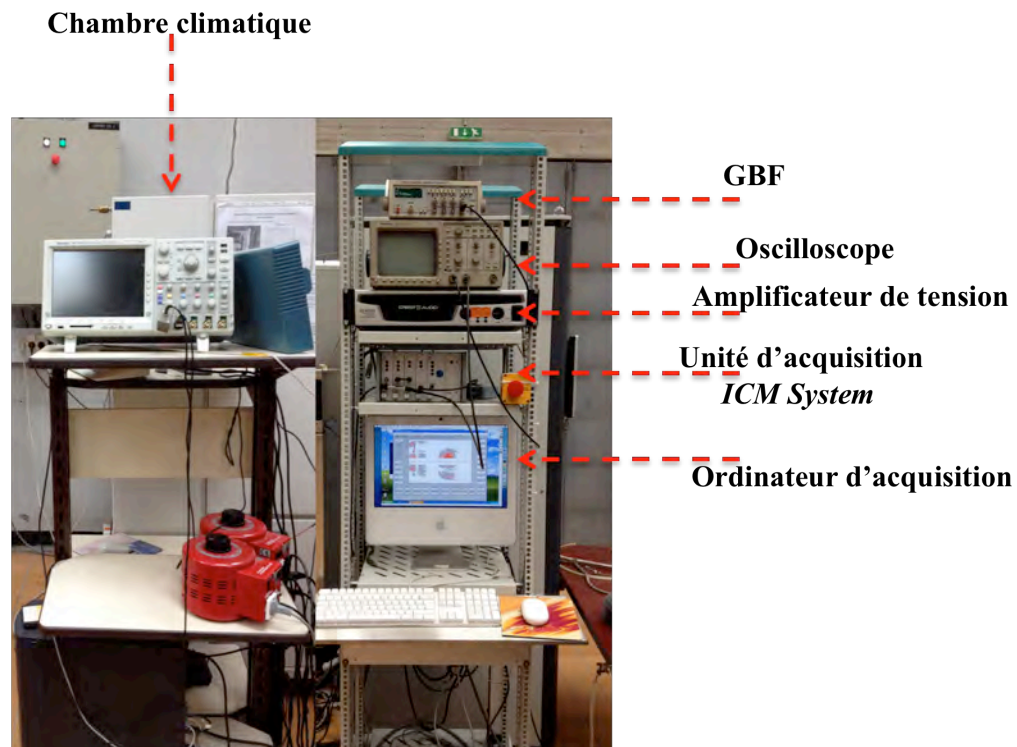


Figure III.14 Photographie de l'ensemble du système de détection et d'acquisition des DP.

III.4 Conclusion

Nous avons développé, dans ce chapitre, un état de l'art sur les décharges partielles où nous avons présenté les différents types de décharges, leurs méthodes de détections, les grandeurs calculées ainsi que les techniques d'analyses des DP. Puis nous avons présenté le dispositif expérimental utilisé pour l'obtention de certains de nos résultats expérimentaux.

Nous nous servirons de cet état de l'art pour expliquer les résultats expérimentaux exposés dans le chapitre IV.

CHAPITRE IV. DECHARGES PARTIELLES DANS LES POLYMERES EN ENVIRONNEMENT AERONAUTIQUE

Chapitre IV Décharges partielles dans les polymères en environnement aéronautique

Dans le chapitre II, nous avons exploité l'influence des paramètres atmosphériques sur la courbe de Paschen ainsi que sur les caractéristiques de la décharge entre deux électrodes métalliques. Or la quasi-totalité des conducteurs installés sur avion sont isolés. Aussi il nous a paru utile d'étudier l'effet de l'insertion d'une couche d'isolation (sur l'une des deux électrodes métalliques) sur la phénoménologie et les caractéristiques de la décharge. Cette étude sera présentée dans ce chapitre, pour aborder ensuite dans le chapitre V, l'effet du vieillissement sous décharge sur la durée de vie de cette couche d'isolation. Le matériau choisi pour notre étude est le polyimide BPDA-PDA appartenant à la gamme des polyimides utilisée comme isolation dans les câblages électriques.

Ce chapitre sera divisé en deux parties. Nous présenterons dans la première partie une introduction générale sur les propriétés et le domaine d'application des polymères, en particulier le polyimide BPDA-PDA, avant d'aborder dans la deuxième partie les résultats expérimentaux obtenus.

La deuxième partie est composée de 3 sous parties. Les décharges électriques étant générées par différents types de défaut (surfaique, volumique..), nous commençons dans un premier temps par une étude sur l'identification de la nature des défauts, qui peuvent être présents dans les SIE, par une analyse statistique. Nous rappellerons les différents paramètres qui permettent ainsi de les classifier.

Dans un second temps, nous allons présenter l'impact de l'environnement aéronautique sur les caractéristiques des décharges (intensité, nombre), qui nous sera utile dans le dernier chapitre pour déduire le paramètre qui influe le plus sur la durée de vie des isolants vieilliss sous décharge.

Pour terminer, une étude comparative entre le cas métal/métal et métal/isolant où l'une des deux électrodes est couverte par un diélectrique est présentée.

IV.1 Définition d'un polymère

Les polymères peuvent être d'origine naturelle (animale ou végétale) ou d'origine synthétique. Les macromolécules naturelles sont les caoutchoucs, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines... Les macromolécules synthétiques sont représentées par exemple par le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le PVC, le PTFE, les polyimides...

Les polymères sont des macromolécules qui comptent un très grand nombre (depuis quelques

milliers jusqu'à l'infini) d'unités fondamentales appelées monomères (également appelées motifs). Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. La cohésion de tels assemblages est due à l'existence de liaisons covalentes qui assurent un lien fortement énergétique entre les atomes constitutifs de la macromolécule, ainsi qu'aux interactions de plus faible énergie qui s'établissent entre les différentes chaînes de polymères.

Les liaisons covalentes constituant le squelette macromoléculaire sont le plus souvent des liaisons carbone-carbone (cas du polyéthylène, du polypropylène, ...), mais peuvent également résulter de la liaison d'atomes de carbone avec d'autres atomes, notamment l'oxygène (cas des polyéthers et des polyesters) ou l'azote (cas des polyamides). Les énergies des liaisons covalentes dans les polymères sont voisines de 400 kJ/mol, ce qui représente une résistance à la rupture environ 20 fois supérieure à celle mesurée pour la plupart des matières plastiques.

La microstructure d'un isolant polymère dicte les propriétés physiques, mécaniques et électriques, que l'on attend de ce matériau.

IV.2 Domaine d'application des polymères

IV.2.1 Généralités

Dans le domaine électrique, le champ d'application des isolants organiques solides est étendu: lignes de transport d'énergie, câbles de télécommunication, condensateurs, alternateurs, moteurs électriques, systèmes électroniques et composants de puissance terrestres et embarqués sur satellites... L'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique présente plusieurs avantages tels que: d'excellentes propriétés électriques (résistivité, rigidité, permittivité), une bonne tenue mécanique et tribologique et une stabilité dimensionnelle. Ajoutons à cette liste, la mise en œuvre facile, le faible poids, pour certains la possibilité de recyclage, ainsi que le coût relativement faible. Le Tableau V.1 présente quelques exemples d'utilisation d'isolants organiques solides dans les systèmes du génie électrique.

Les câbles haute tension, 400 kV, sont principalement utilisés pour assurer l'évacuation de la puissance de certaines centrales électriques. Leur puissance unitaire va de 600 à 1200 MW. Les artères de pénétration dans les grandes agglomérations utilisent des câbles 225 kV, 300 à 600 MW.

Les câbles moyenne tension (20 kV) constituent une très grande partie du réseau de distribution d'énergie électrique. Les câbles basse tension quant à eux, constituent le plus sûr et le plus esthétique moyen de distribution de l'énergie électrique à l'utilisateur. Une des gammes des polymères isolants utilisées dans ce type de câble est la gamme des polyimides. Leurs domaines d'application, ainsi que les propriétés d'un type des polyimides, qui est le BPDA/PDA, sont présentés dans la partie suivante.

Exemple de polymères isolants	Applications
Polyéthylène (PE)	Câbles HT, HF
Polyéthylène réticulé (PR)	Câbles THT
Polychlorure de vinyle (PVC)	Câbles BT
Polypropylène (PP)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène téréphtalate (PET)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène naphthalène (PEN)	Câbles, condensateurs
Polysulfones, polyéther-éther-cétones (PEEK)	Accessoires électriques automobiles
Polyépoxy	Electrotechnique : entretoise, moteurs, isolateurs
Polyamides, Polyimides	Câbles BT des alimentations des avions

Tableau IV.1 Exemples d'utilisation des isolants organiques solides [LAH09]

IV.2.2 Domaine d'application des polyimides

L'industrie aéronautique utilise majoritairement des câbles avec une superposition de différents matériaux isolants (Figure IV.1). L'une des isolations utilisée depuis l'année 1970 [COL06] dans ces types de câble est le Polyimide. Il a été choisi pour sa bonne rigidité électrique et sa capacité à maintenir une bonne résistance mécanique sous haute température.



- 1 – conducteurs : multibrins en cuivre nickelé
- 2 – Isolation Polyimide ;
- 3 – Isolation PTFE

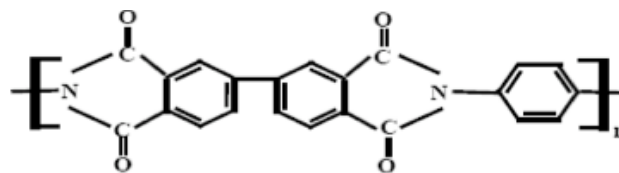
Figure IV.1 Exemple de câble

Il est présent dans la plupart des structures adaptées à la montée en température vu ces bonnes propriétés thermiques (température de transition vitreuse supérieure à 300 °C et une température de décomposition supérieure à 520 °C), et électriques (avec des champs de rupture élevés (>1 MV/cm), des faibles facteurs de pertes diélectriques ($< 10^{-2}$ à 25 °C à 1 kHz) et sa simplicité de mise en œuvre.

Outre le domaine de câblages électriques et l'électronique de puissance, le polyimide est très utilisé en microélectronique comme passivation des composants silicium. Ils viennent en

général renforcer en termes d'épaisseur la couche de passivation inorganique, pour une meilleure tenue en tension, mais aussi pour des raisons de protection mécanique et chimique.

Toutes ces applications rendent nécessaire l'étude de polyimide sous les contraintes spécifiques à chaque application ; dans notre étude nous nous intéressons aux câblages électriques dans l'aéronautique. Les isolations utilisées dans de tels systèmes subissent des changements de leurs propriétés qui résultent des différents mécanismes de dégradation induits par les différents phénomènes qui peuvent être présents dans l'environnement d'application tels que les décharges partielles, l'érosion... Ces phénomènes aboutissent à une défaillance électrique des câbles. Une étude menée par Boeing a montré qu'entre les années 1992 et 2000 [JOH], presque deux tiers des incendies en vol sur les avions Boeing étaient d'origine électrique. Chaque année plus de 1000 missions [HAU06] sont annulées à cause des problèmes de câblages électriques. D'où la nécessité d'une meilleure compréhension des phénomènes qui conduisent au vieillissement des isolants des câblages électriques. Pour notre étude nous avons choisi le biphenyltetracarboxylic dianhydride acid *p*-phenylene diamine (BPDA/PDA) qui appartient à la gamme des Polyimides, et ayant la structure chimique suivante :



BPDA-PDA

Figure IV.2 Formule chimique du BPDA/PDA

IV.2.2.1 Propriétés et structure du polyimide BPDA/PDA

IV.2.2.1.1 Propriétés du BPDA/PDA

Le polyimide BPDA-PDA choisi est un de ceux qui a les meilleures propriétés thermiques, en terme de stabilité et de température de transition vitreuse (T_g). La plupart des valeurs de T_g ont été obtenues par « Dynamic Mechanical Thermal Analysis » et sont supérieures à 300°C [ALF01][KIM95][HO94]. La température de décomposition qui correspond à une perte de masse de 5% a été évaluée à 620°C par analyse thermogravimétrique [DIA07b], et les travaux menés par [KHA] ont démontré que ce polymère conserve ses bonnes performances électriques jusqu'à 300°C pour des longues durées et quelle que soit l'atmosphère.

Les propriétés physiques données par le fabricant pour le polyimide sont rappelées dans le Tableau IV.2.

Température de transition vitreuse	>360 °C
Température de décomposition	620 °C
CTE	3-7 ppm/ °C
Constante diélectrique (à 1 kHz et 25 °C)	2.9
Facteur de pertes (à 1 kHz et 25 °C)	2.10^{-3}
Champ de rupture diélectrique (à 25 °C)	> 2 MV/cm
Résistivité volumique (à 25 °C)	> $10^{16} \Omega.cm$

Tableau IV.2 Propriétés du PI2611 (BPDA/PDA) données par le fabricant

IV.2.2.1.2 Analyse de la structure chimique du BPDA/PDA

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR: Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau. Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchie ou transmise. Le domaine infrarouge entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} ($2.5 - 25 \mu\text{m}$) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules. L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde que le matériau absorbe et les intensités de l'absorption [FTIR].

La Figure IV.3 présente l'analyse spectrale typique du BPDA/PDA. Il est ainsi possible d'observer les différentes bandes d'absorption, correspondant aux différents groupements imides.

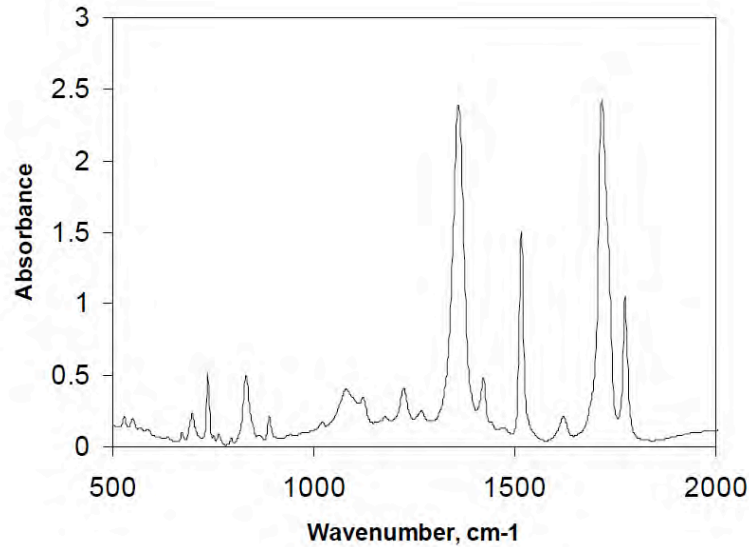


Figure IV.3 Spectre FTIR du BPDA/PDA [JIE04].

Un spectre typique de la spectroscopie infra-rouge d'un film BPDA/PDA montre les modes vibrationnels dont les plus importants sont les suivants : 1760cm^{-1} [$\nu_s(\text{C}=\text{O})$, Imide I], 1700cm^{-1} [$\nu_{as}(\text{C}=\text{O})$, Imide I], 1510cm^{-1} [$\text{C}=\text{C}$ étirement tangentiel du cycle PDA, $\text{C}=\text{C}_{\text{PDA}}$], 1340cm^{-1} [$\text{C}-\text{N}-\text{C}$ étirement axial, Imide II] et 738cm^{-1} [$\text{C}-\text{N}-\text{C}$ déformation hors plan, Imide IV] [HIE98a][HIE98b].

IV.3 Résultats et analyse

L'impact des paramètres atmosphériques sur la courbe de Paschen ainsi que sur les caractéristiques de la décharge entre deux électrodes métalliques ont été déjà exploités dans le chapitre II. Or la quasi-totalité des conducteurs installés sur avion sont isolés. Ces matériaux isolants utilisés ne sont jamais parfaitement homogènes ; ils peuvent être le siège de plusieurs types de défauts qui peuvent être à l'origine des DP. Alors, il sera intéressant en premier lieu de présenter une méthode diagnostique pour l'identification de la nature de ces défauts, qui sont responsables de la naissance des DP et par conséquent du vieillissement précoce des isolants. Pour passer ensuite à une étude expérimentale sur l'influence des différents paramètres atmosphériques sur les caractéristiques des décharges générées par ces défauts (le dispositif expérimental utilisé pour accomplir ces deux tâches est celui présenté dans le chapitre III). Pour en finir par une étude comparative avec celle menée dans le chapitre II afin de connaître si les mêmes phénomènes physiques régissent le développement de la décharge dans les deux cas ; dans ce cas là on a utilisé le dispositif expérimental présenté dans le chapitre II. Pour atteindre ces objectifs, une couche d'isolation a été introduite au moins sur l'une des deux électrodes métalliques. Le matériau choisi est le polyimide BPDA-PDA appartenant à la gamme des polyimides utilisée comme isolation dans les câblages électriques. La mise en œuvre des échantillons de polyimide a été réalisée au sein du LAPLACE, et présentée dans le paragraphe suivant.

IV.3.1 Mise en œuvre du polyimide étudié

Le polyimide BPDA-PDA a été déposé en couche mince à partir de la résine Pyralin et PI 2611 de chez HD Microsystems [**HDM-PI-2600**]. Cette résine se présente sous la forme d'une solution contenant les deux monomères BPDA et PDA, qui réagissent pour former l'acide polyamique (PAA), précurseur du polyimide.

Les films de polyimide ont été déposés par la technique de spin-coating sur des substrats d'acier inoxydable. Les substrats en acier inoxydable polis miroir ont été nettoyés dans des bains de décontamination organique (trichloroéthylène, acétone, et de l'acide sulfurique $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$). Les dépôts sont réalisés en salle blanche en plusieurs étapes. Dans un premier temps, un promoteur d'adhérence est déposé au centre des substrats suivi par une rotation pendant 30 secondes avec une vitesse de 500 tours/minutes (trs/min) afin de l'étaler sur tout le substrat. Un recuit du promoteur à 100 °C pendant 1 min permet d'améliorer l'adhérence entre le polyimide et le substrat. Ensuite la résine est déposée et pré-étalée sur le substrat avec une vitesse de rotation de 500 trs/min pendant 10 secondes, suivi par l'étalement final avec des vitesses entre 2000 et 4000 trs/min afin d'obtenir des épaisseurs différentes (voir Figure IV.4)



Figure IV.4 Etapes de dépôt des résines de polyimide par centrifugation : (a) dépôt de la résine, (b) pré-étalement à 500 trs.min⁻¹, (c) étalement entre 2000 et 4000 trs.min⁻¹.

Un recuit « soft cure » à 175 °C pendant 3 minutes sur une plaque chauffante dans l'air afin de solidifier la couche, est suivi par un recuit d'imidisation final « hard cure » à 400 °C pendant une heure sous N_2 suivant un profil optimisé et illustré sur la Figure IV.5 [**DIA11a**].

a)



b)

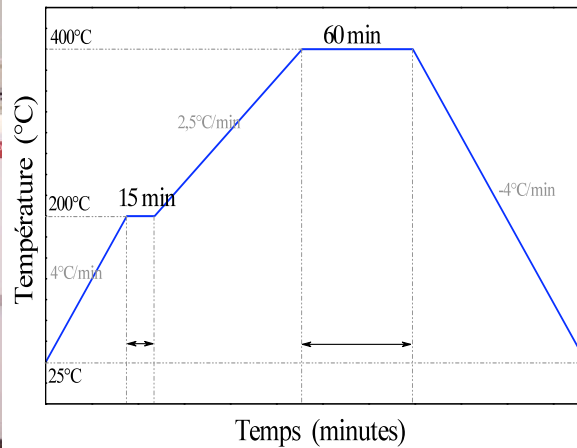


Figure IV.5 Four de recuit sous N₂ (a) et cycle optimisé du recuit du polyimide (b).

Pour le dépôt en multicouches, la seconde couche est déposée sur la première après le recuit « soft cure » de celle-ci, et les mêmes étapes se succèdent après. Les différentes épaisseurs obtenues pour la résine PI2611 avec différentes vitesses de rotation et différents nombres de couches sont représentées dans le Tableau IV.3.

Résine	Vitesse de dépôt (tours/min)	Nombre de couches déposées	Epaisseur finale (μm)
PI 2611	4000	1	4,2-4,4
PI 2611	2000	1	8
PI2611	4000	2	8,6
PI2611	2000	3	24

Tableau IV.3 Variation de l'épaisseur finale du polyimide pour la résine PI2611 avec le nombre de couches et la vitesse de rotation.

IV.3.2 Identification de la nature des défauts par analyse statistique

Quelle que soit la technologie d'élaboration des câbles envisagés, on peut observer des défauts qui peuvent être le siège des DP pouvant conduire à leur tour à la rupture du diélectrique. Les mécanismes de dégradation dépendant de la nature du défaut (surfactive, volumique..), il est important de connaître le type de défaut, afin de prédire le mécanisme de dégradation sous DP le plus probable.

Par exemple, on peut observer des cavités occluses dans le système d'isolation (Figure IV.6) qui peuvent être le siège de DP si les conditions sur la tension sont remplies. Les décharges générées par ce type de défaut sont des décharges internes.

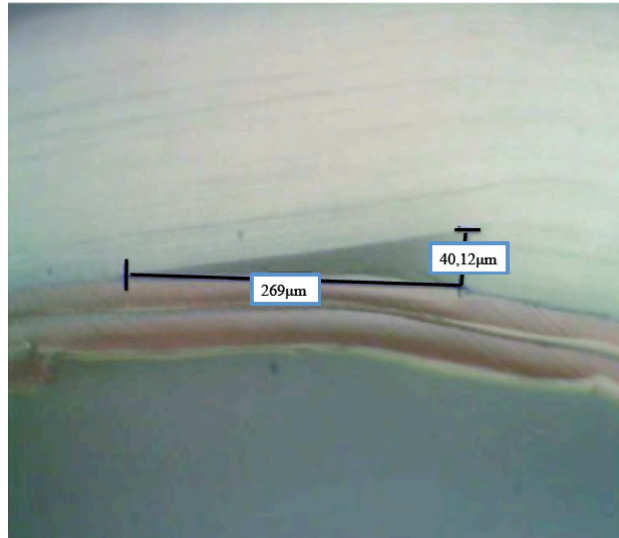


Figure IV.6 Cavité à l'interface entre deux couches PI-PTFE

D'autres types de défauts peuvent être créés par les contraintes imposées par l'environnement et le fonctionnement des câbles telles que celles dues aux manipulations pendant la phase d'installation. Il peut s'agir par exemple des effets de pointe liés au passage à proximité d'un plan de masse ou d'une arête. Dans ce cas là, les décharges générées sont soit des décharges de surface soit des décharges corona.



Figure IV.7 Passage à proximité d'une arête

L'une des méthodes utilisées pour pouvoir localiser l'origine des décharges est basée sur les méthodes statistiques développées dans le chapitre III. Elle est présentée dans le paragraphe suivant à partir de défauts créés artificiellement.

IV.3.2.1 Protocole expérimental

Comme chaque type de DP (décharge interne, corona, . . .) est caractérisé par un ensemble de paramètres qui lui est propre, tels que la moyenne, l'écart type, le kurtosis, . . ., l'approche

[GUL2] consiste à utiliser ces quantités statistiques pour déduire la nature des décharges. En effet, lors des mesures des DP chaque impulsion est enregistrée et affichée en fonction de sa position « φ » et de son amplitude « Q ». Il en résulte un diagramme « φ, Q, n », où n représente le nombre de décharges. D'après ces diagrammes, on peut déduire les valeurs de ces quantités qui contiennent des informations sur les diverses propriétés du défaut générant les DP.

Le logiciel d'acquisition du système ICM présente de nombreuses fonctionnalités. Il permet de fixer certains paramètres de l'expérience : la gamme de fréquence spectrale de détection utilisée, la calibration, la durée d'acquisition et le niveau de l'amplification.

Les résultats d'une acquisition peuvent se regrouper dans un tableau (Figure IV.8) qui donne pour chaque mesure les paramètres calculés ainsi que les graphes obtenus. Enfin, la charge apparente des différentes décharges, leur nombre et leur distribution dans la phase peuvent être relevés directement. Le logiciel permet de calculer pour chaque polarité, les grandeurs statistiques (*Skewness et Kurtosis*).

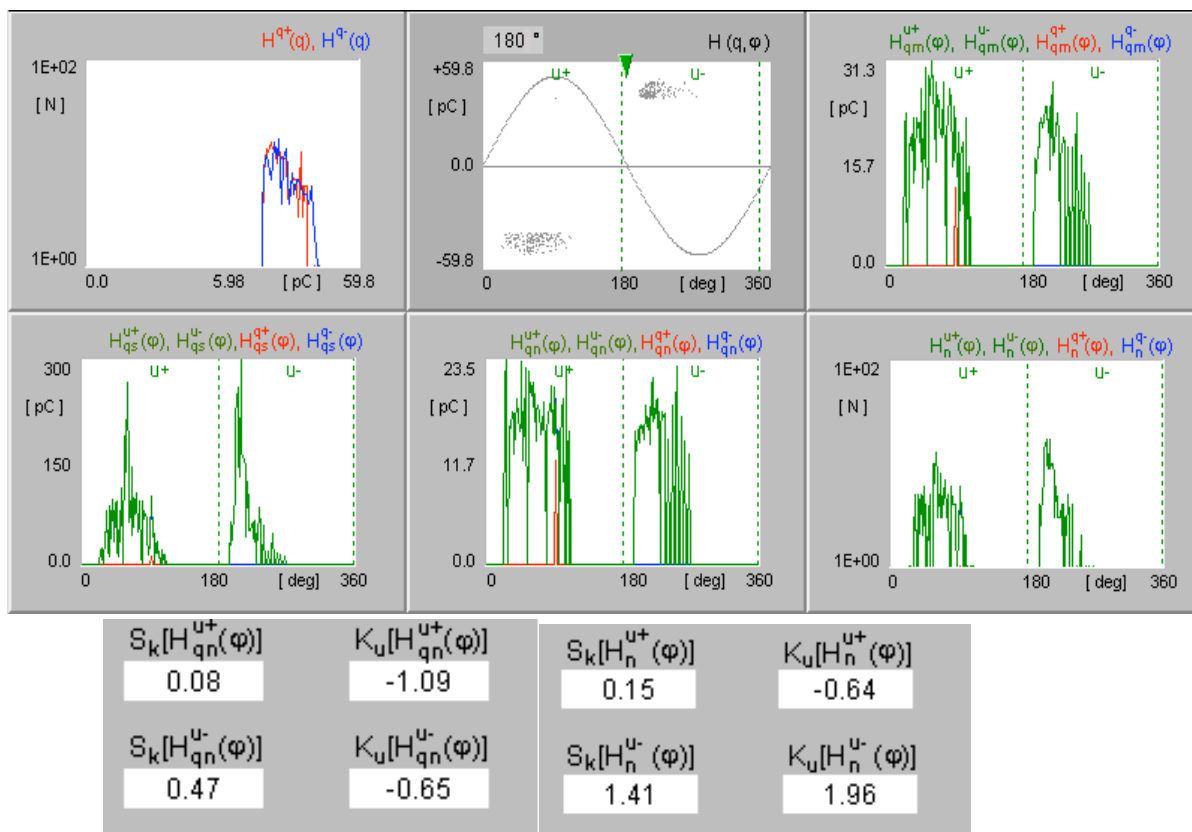


Figure IV.8 Exemple d'une acquisition des DP

Selon la littérature **[PHU97, ZHA06]**, les décharges peuvent se scinder en trois familles : les décharges internes, les décharges de surface et les décharges corona. Ces types de décharges sont caractérisés par des patterns fondamentalement différents. Nous allons dans la suite

illustrer de nombreux diagrammes relatifs à ces différents types de décharges générés par les modèles de défauts artificiels suivant:

- Décharge interne : a- dielectric bounded cavity (voir Figure IV.9c)
b- electrode bounded cavity (voir Figure IV.9a)
- Décharge de surface (voir Figure IV.9d)
- Décharge corona (voir Figure IV.9b)

Le diélectrique utilisé est un polyimide (BPDA/PDA) de $24\mu\text{m}$ d'épaisseur déposé sur des substrats en inox. Pendant les essais des décharges internes de type a, l'objet sous test est formé par deux échantillons de PI de $24\mu\text{m}$ d'épaisseur séparés par un film de Kapton de $50\mu\text{m}$ d'épaisseur, percé au milieu pour former une cavité. Ce système est placé dans un champ électrique homogène, entre deux électrodes de types Rogowski (voir Figure IV.9c) alors que pour les essais des décharges corona, une pointe métallique, ayant un rayon de courbure de 5 mm, est espacée de 1 mm du diélectrique (voir Figure IV.9b).

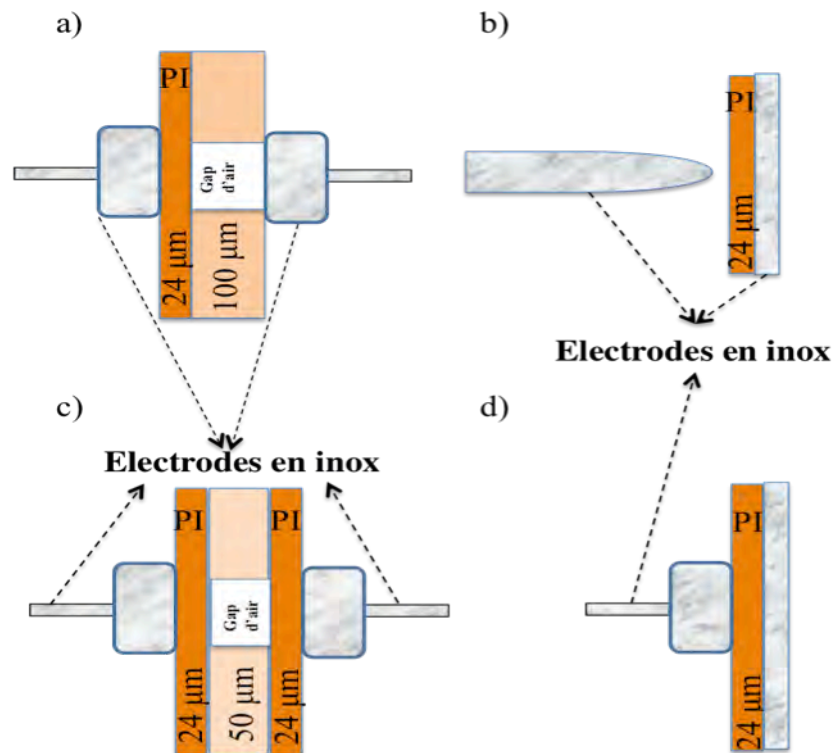


Figure IV.9 Modèles de défauts artificiels.

Durant les tests, le système est soumis à une tension équivalente à $1,2 \times \text{TADP}$ pendant une durée d'environ 20 minutes. L'expérience a montré [GUL89] [GUL90] qu'une période de test de 20 min est suffisante pour enregistrer les caractéristiques d'une décharge. La valeur de la tension appliquée lors de l'essai est choisie d'une manière qu'aucune extinction de décharge n'est prévue durant la période de test. Les distributions de $H_n(\varphi)$ et $H_{qn}(\varphi)$ enregistrées pendant 20 min sont étudiées en utilisant comme opérateurs statistiques Sk pour $H_{qn}(\varphi)$ et Ku pour $H_n(\varphi)$. Par contre Sk de $H_n(\varphi)$ et Ku de $H_{qn}(\varphi)$ ont été rejetés comme discriminateurs car aucune information ne pourrait être obtenue de ces deux opérateurs.

Pour enregistrer les changements au cours des essais, la durée de tests a été divisée en des intervalles de 2 minutes et pour chaque demi cycle de tension les valeurs de N_{q+} , N_{q-} , courant (i) ainsi que les distributions $H_n(\varphi)$ et $H_{qn}(\varphi)$ ont été enregistrées automatiquement dans le logiciel. L'analyse des distributions à partir des operateurs a été réalisée à la fin du test.

IV.3.2.2 Acquisition et traitement des données

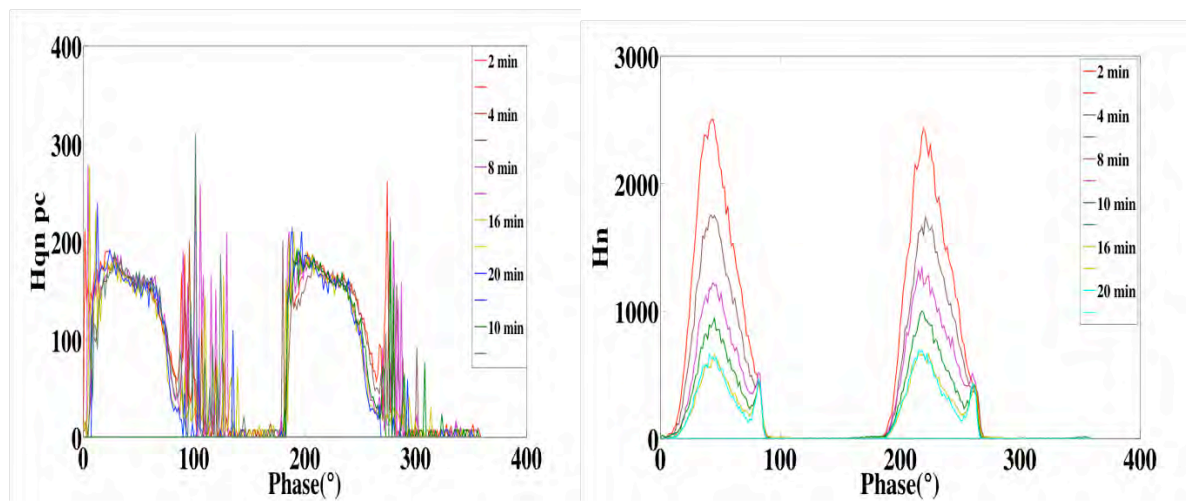
Les différentes caractéristiques des systèmes utilisés sont représentées dans le tableau suivant :

Configuration du système	Profondeur de la cavité (μm)	TADP mesurée (V)	Tension appliquée (V) (1,2xTADP)	Epaisseur du diélectrique (PI) couvrant l'électrode (μm)
Dielectric bounded cavity	50	570	655	24
Electrode bounded cavity	100	675	755	24
Décharge de surface	-----	380	468	24
Décharge corona (gap d'air de 1mm)	-----	2900	3400	24

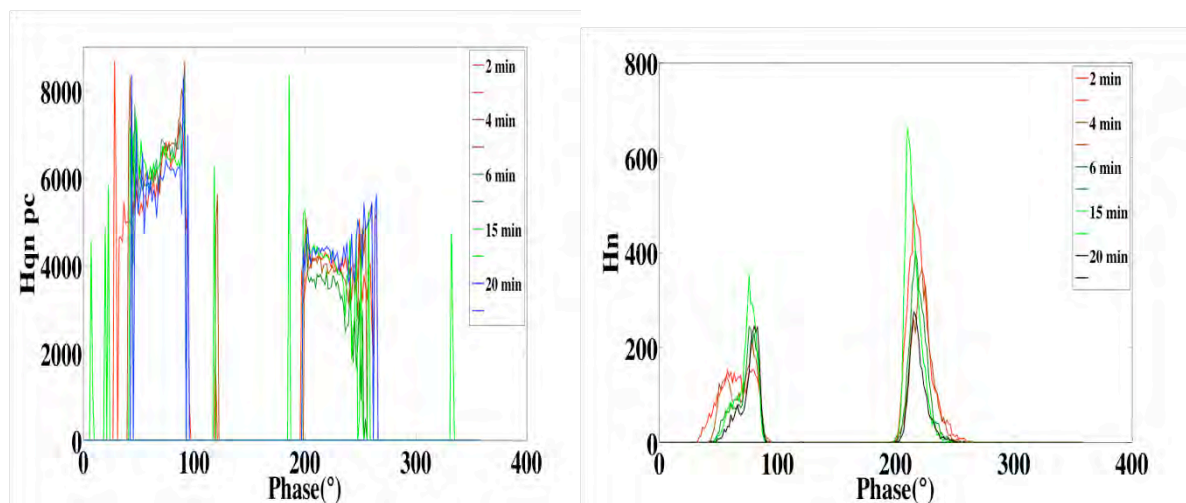
Tableau IV.4 Caractéristiques des défauts artificiels

La Figure IV.10 présente une comparaison entre les distributions H_n et H_{qn} pour les différents types de défauts artificiels. En comparant les diagrammes obtenus selon la nature du défaut, présentés ci dessous avec ceux présents dans la littérature (voir [Annexe 1]), on constate une ressemblance entre les deux [GUL92] [GUL93a].

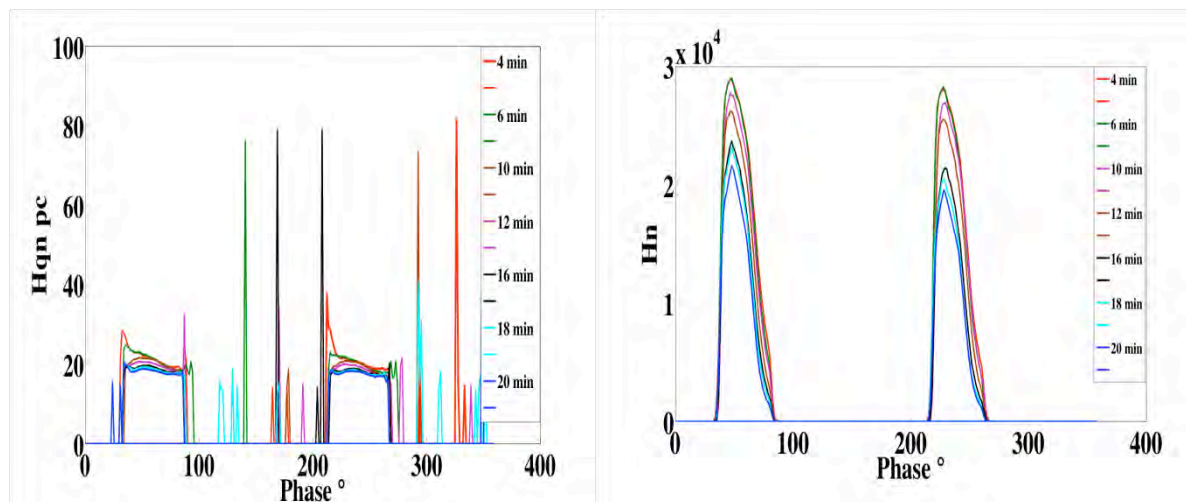
a) Décharge interne de type a : Dielectric bounded cavity



b) Décharge interne de type b : électrode bounded cavity



c) Décharge de surface :



d) Décharge corona:

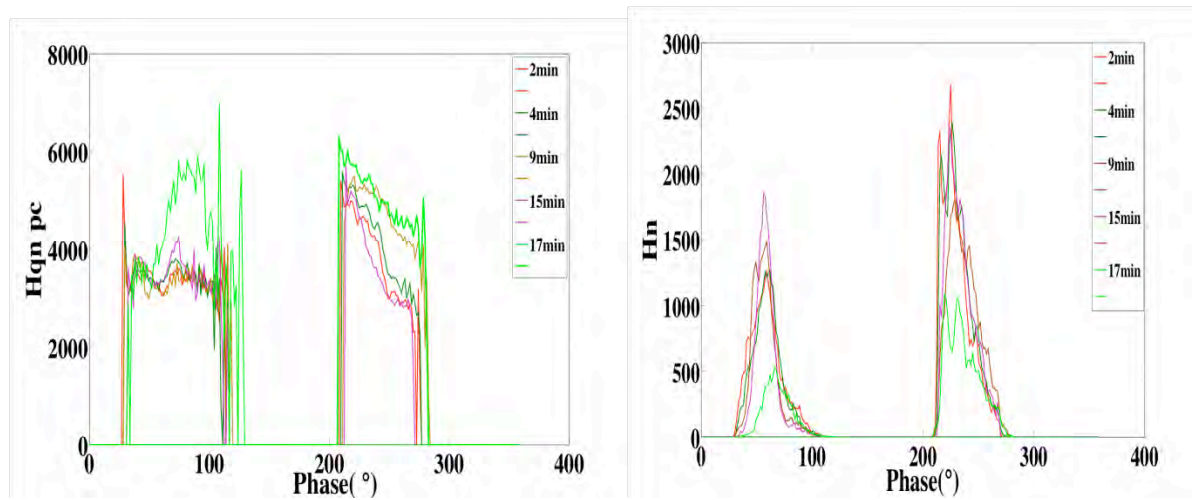
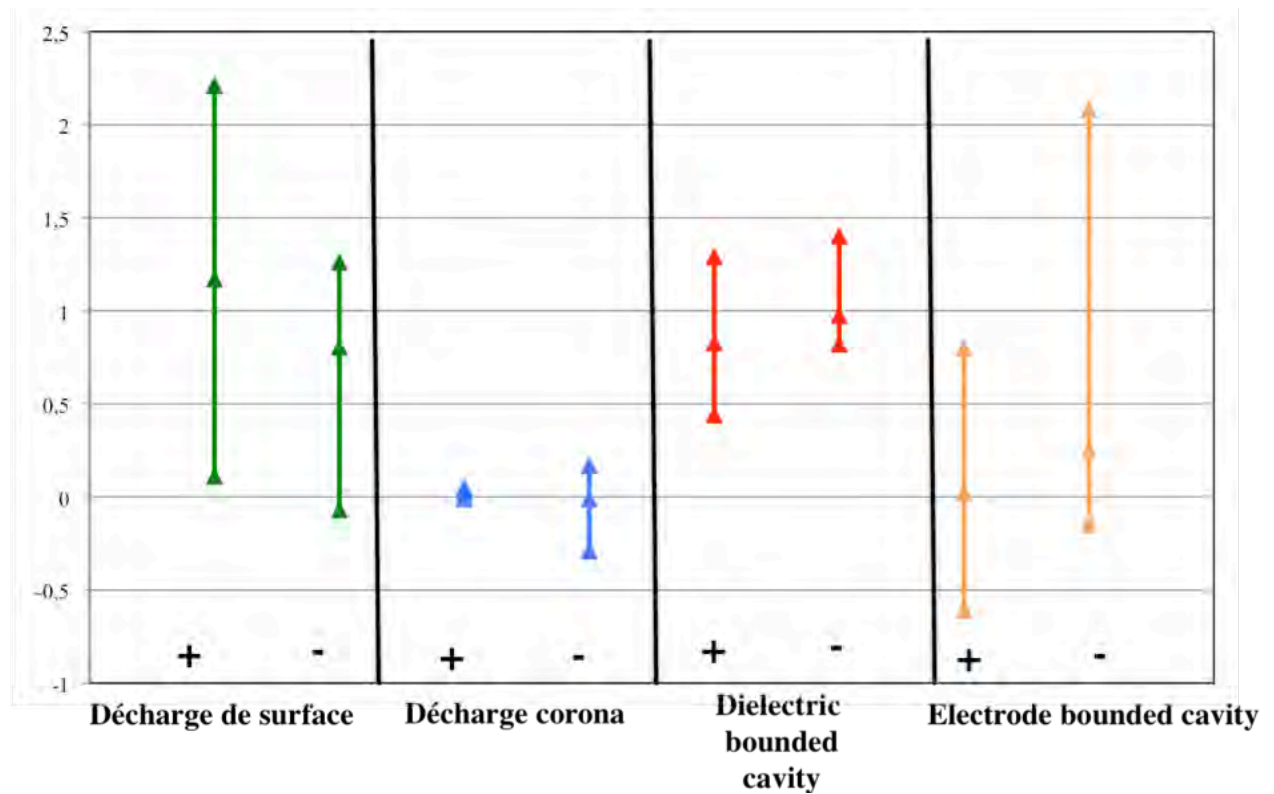


Figure IV.10 Distribution du nombre et de l'intensité des décharges en fonction de l'angle de phase

La comparaison entre ces différentes distributions montre que chaque défaut est caractérisé par une forme spécifique de H_n et H_{qn} [GUL93]. Puisqu'il n'est pas facile de décrire ces différences d'une manière quantitative, des opérateurs statistiques ont été utilisés pour analyser ces distributions. Les valeurs de ces opérateurs, obtenues pour chaque type de défaut, sont représentées dans les tableaux suivants.

a) Sk de $H_{qn}(\varphi)$



b) Ku de $H_n(\varphi)$

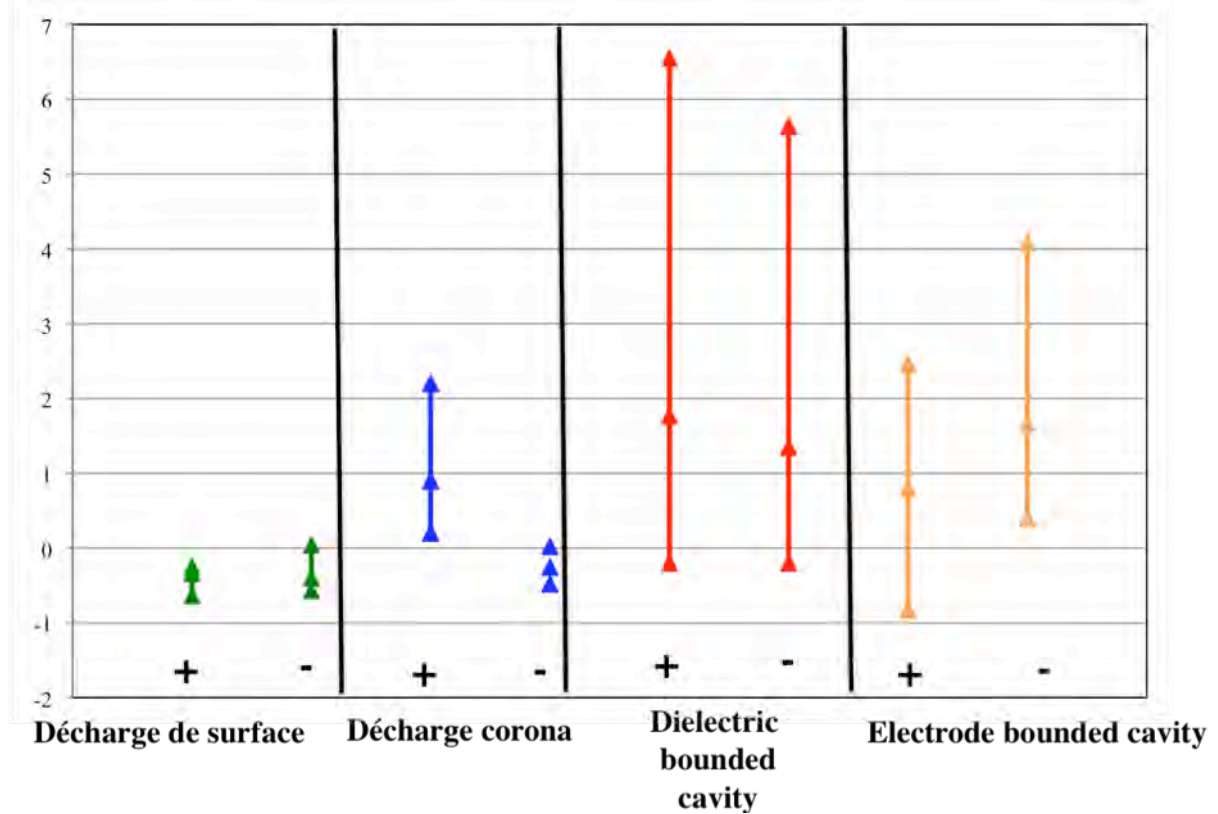


Figure IV.11 Valeurs de Sk et Ku suivant la nature de défaut, les flèches représentent les intervalles de confiance à 80%.

Les Figure IV.11a et 10b montrent les valeurs Sk de H_{qn} et les valeurs Ku de H_n respectivement. Il a été démontré que chaque type de décharge est caractérisé par des distributions spécifiques de H_{qn} et H_n et par conséquent par des valeurs de Sk et Ku particulières :

Skewness de $H_{qn}(\varphi)$

Les distributions H_{qn} des décharges de surface [GUL92] et des décharges internes de type a [GUL93a] sont caractérisées par des valeurs positives de Sk pour H_{qn}^+ , alors que les décharges internes de type b et les décharges corona sont caractérisées par des valeurs variables de Sk pour H_{qn}^+ [GUL93a].

Les décharges de surface, les décharges corona et les décharges internes de type b sont caractérisées par des valeurs variables de Sk pour les distributions H_{qn}^- [GUL92] [GUL93a]. Pour finir, les décharges internes de type a sont caractérisées par des valeurs positives de Sk pour la distribution H_{qn}^- [GUL93a].

Kurtosis de $H_n(\varphi)$

Les distributions H_n des décharges de surface [GUL92] sont caractérisées par des valeurs négatives de Ku pour H_n^+ et H_n^- .

Les distributions H_n des décharges corona [GUL93a] sont caractérisées par des valeurs négatives de Ku pour H_n^- et des valeurs positives de Ku pour H_n^+ .

Alors que les décharges internes de type b [GUL93a] sont caractérisées par des valeurs positives de Ku pour la distribution H_n^- et des valeurs variables pour la distribution H_n^+ .

Pour finir, les décharges internes de type a [GUL93a] sont caractérisées par des valeurs variables de Ku pour les distributions H_n^+ et H_n^- .

IV.3.2.3 Conclusion

Il a ainsi été démontré que chaque source de décharge est caractérisée par une séquence spécifique de ses paramètres statistiques en raison de sa géométrie, son emplacement dans l'isolant, les propriétés du diélectrique et du champ électrique appliqué [GUL93]. Les diagrammes des distributions de H_{qn} et H_n ainsi que leurs opérateurs statistiques présentent un outil diagnostique pour l'identification de la nature de défaut générant les décharges électriques dans les isolants.

Après avoir identifié la nature du défaut, nous allons étudier l'influence de l'environnement aéronautique sur les caractéristiques de la décharge générée par ces défauts.

Un seul type de défaut sera choisi pour aborder cette deuxième partie. Comme dans le chapitre II, nous avons présenté les résultats obtenus pour la configuration pointe/plan, nous nous limiterons à cette configuration.

IV.3.3 Influence de l'environnement aéronautique sur les caractéristiques des décharges

Pour étudier l'influence des paramètres atmosphériques sur les caractéristiques de la décharge électrique, une comparaison entre les valeurs de la TADP mesurées et celles calculées par les différentes expressions trouvées dans la littérature a été réalisée. Une étude sur l'influence de l'environnement aéronautique sur les différentes caractéristiques de la décharge telles que le nombre et l'intensité a ensuite été abordée. Pour réaliser ces essais une des deux électrodes métalliques, a été couverte par une couche de PI de 24 μ m d'épaisseur, « e » (voir Figure IV.9b).

Puis, pour chaque condition appliquée, la TADP, leur nombre ainsi que leur intensité sont mesurés au moment de leur apparition dans un gap d'air de 675 μ m séparant une pointe métallique ayant un rayon de courbure de 5mm et l'électrode plane couverte par la couche de PI. Le dispositif expérimental utilisé est celui détaillé dans le chapitre III.

Pour calculer la tension de claquage entre le film isolant et l'électrode métallique, l'expression suivante a été utilisée :

$$V = V_{air} \left(1 + \frac{e}{d\epsilon_r}\right) \quad \text{IV.1}$$

V_{air} représente la tension de claquage calculée, en fonction de la variation des conditions atmosphériques (T, Hr, P) ainsi que de la distance interélectrodes, par les équations de tension qui se trouvent dans la littérature et qui sont exposées dans le paragraphe II.1.6.3 du chapitre II, pour le cas métal/métal. Ces équations sont rappelées dans le tableau suivant :

Variation de la	Pression, Distance Eq (IV.2)	Température Eq (IV.3)	Humidité Eq (IV.4)
Tension de claquage dans l'air	$V_{air} = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)}$	$V_{air} = \frac{B\left(\frac{p_0 T}{T_0}\right)d}{C + \ln\left(\left(\frac{p_0 T}{T_0}\right)d\right)}$	$V_{air} = V_{CNTP} \left(1 + \frac{K_h}{100}(h - h_{CNTP})\right)$

Tableau IV.5 Expressions de la TADP en fonction des paramètres atmosphériques

La validité de ces équations a été exploitée dans le cas métal/métal dans le chapitre II. Dans ce qui suit nous allons étudier leur validité lorsque l'une des électrodes métalliques sera couverte par un isolant. Dans ce cas là, la tension de claquage sera calculée par l'équation (IV.1) en substituant V_{air} par une des équations présentées dans le Tableau IV.5, suivant les conditions appliquées.

IV.3.3.1 Effet de la pression

La tension de claquage en fonction de la pression à température ambiante peut être calculée d'après l'équation (IV.1) en substituant V_{air} par celle déduite de la loi de Paschen « l'équation (IV.2) ». D'après la Figure IV.12 une bonne corrélation entre nos points expérimentaux et ceux calculés est observée. En plus, nous pouvons remarquer que la tension de claquage décroît linéairement avec la diminution de la pression.

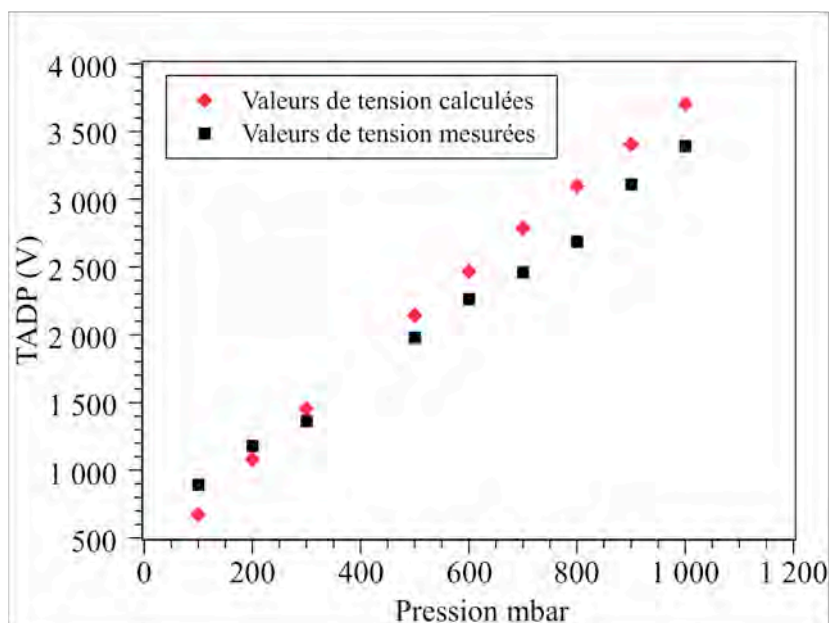


Figure IV.12 Variation de la tension d'apparition des décharges en fonction de la pression.

Au moment de l'apparition des décharges deux autres grandeurs ont été mesurées : l'intensité des décharges et leur nombre. La Figure IV.13 présente la variation de ces deux grandeurs en fonction de la pression.

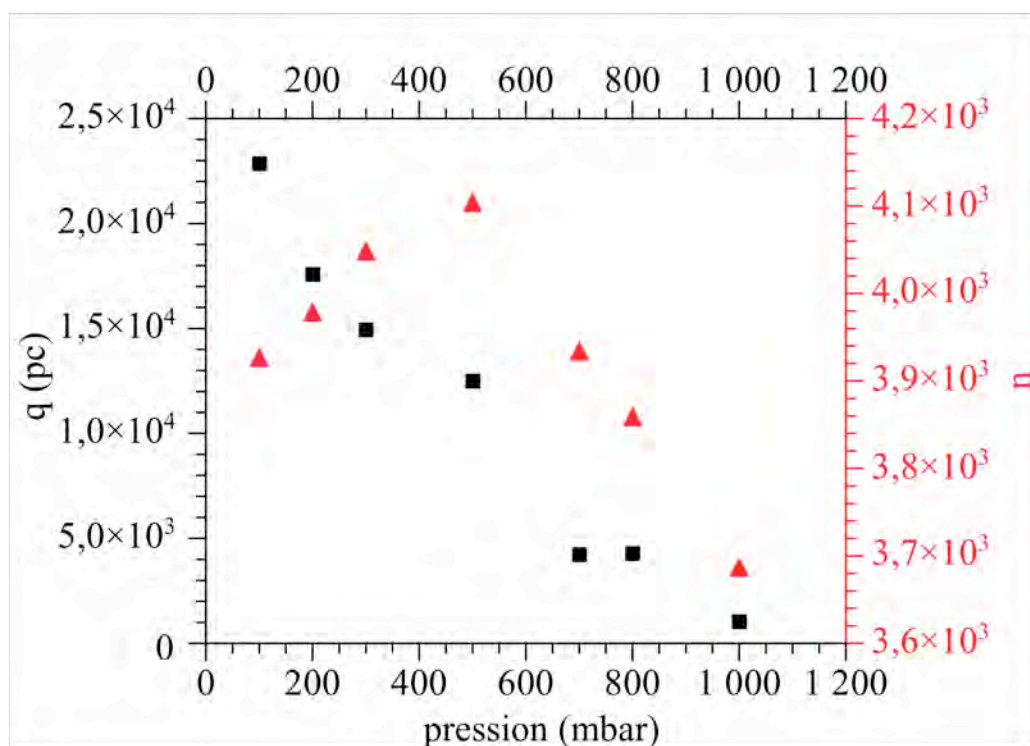


Figure IV.13 Variation du nombre et de l'intensité des décharges en fonction de la pression.

Une diminution de la pression conduit à une augmentation de l'intensité des décharges [LIU06] [RUI10]. Cette augmentation peut être expliquée par l'augmentation du niveau

d'ionisation sous faible pression résultant des décharges électriques plus intenses. En fait pour des faibles valeurs de pression, la densité de l'air est faible et par conséquent le lpm des électrons est grand [SAL01], et donc les électrons gagnant plus d'énergie entre deux collisions génèrent des décharges ayant des intensités plus élevées.

Concernant le nombre de décharges, on note l'apparition de deux comportements différents suivant la valeur de la pression appliquée :

- En diminuant la pression de 1000mbar jusqu'à 500mbar, nous remarquons que le nombre de décharges augmente. Cette augmentation est liée à l'augmentation de la zone polarisée due à un changement de régime de décharge. Sous pression atmosphérique, la décharge est filamentaire, elle est formée de plusieurs canaux d'environ 100 microns de diamètre traversant le gap [KOG97]. Le plasma généré est donc fortement inhomogène, et sa couverture volumique est en réalité assez faible. Or en diminuant la pression, la décharge devient diffuse, caractérisée par un nombre plus élevé de décharges, couvrant tout l'espace interelectrodes.
- Pour des valeurs inférieures à 500mbar, ce comportement s'inverse et le nombre de décharges diminue. Il a été démontré qu'en diminuant la pression, les électrons gagnent plus d'énergie entre deux collisions, mais à cause de la raréfaction de la matière sous faible pression, la multiplication électronique n'est pas suffisante dans l'espace interélectrodes pour en déclencher plusieurs décharges, et de ce fait, plus la pression diminue, plus le nombre de décharges tend à diminuer.

IV.3.3.2 Effet de la température

Il existe dans la littérature plusieurs corrections concernant le calcul de la TADP en fonction de la température, à pression atmosphérique, dont la correction de Dunbar qui a été déjà définie dans le chapitre II. La variation de la TADP en fonction de la température à pression atmosphérique (distance interélectrodes fixe) est déduite d'après l'équation (IV.1) en remplaçant V_{air} par l'équation (IV.3).

La température a été augmentée par palier de 20°C de la température ambiante jusqu'à 90°C. L'échantillon est thermalisé pendant un certain temps avant chaque mesure de DP. Là encore, d'après la Figure IV.14, une bonne corrélation entre les valeurs de la TADP mesurées et celles calculées est observée.

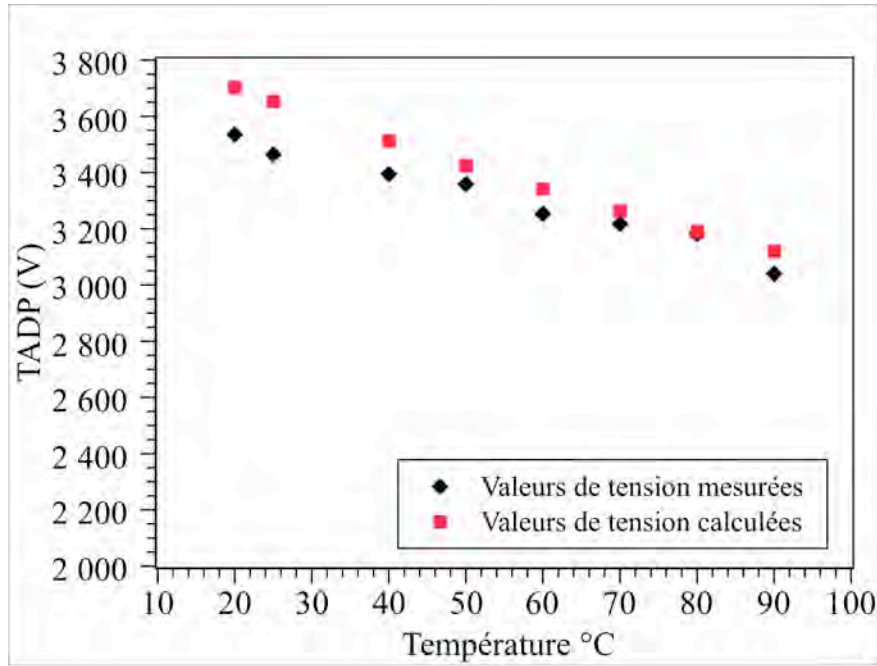


Figure IV.14 Variation de la tension d'apparition des décharges en fonction de la température

Une augmentation de la température est équivalente à une diminution de la TADP (voir Figure IV.14). Cette diminution a été expliquée dans le chapitre II en se référant au libre parcours moyen des électrons.

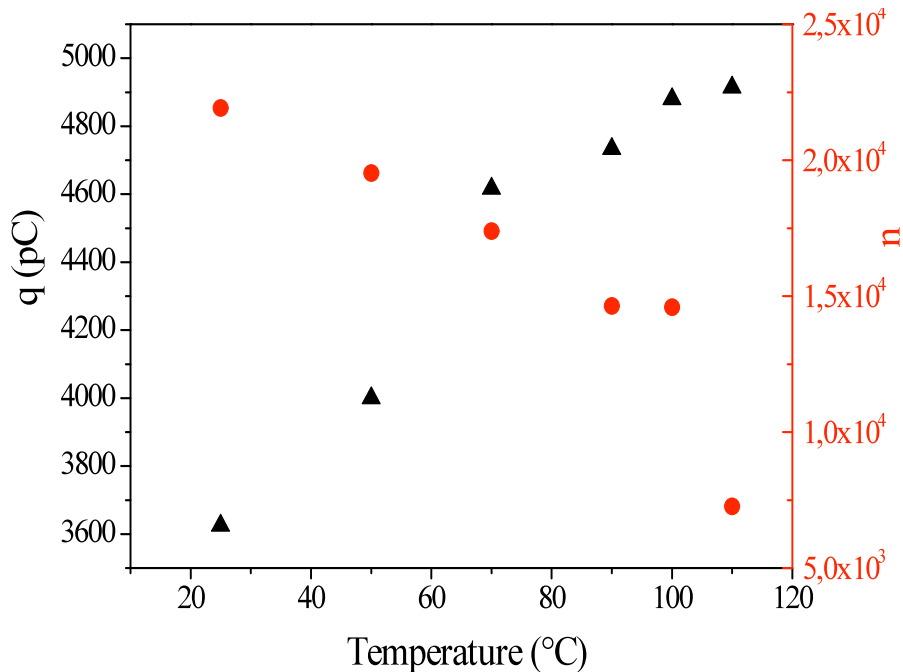


Figure IV.15 Variation du nombre et de l'intensité des décharges en fonction de la température

L'augmentation de la température conduit à une diminution du nombre de décharges et à une augmentation de leur intensité [LOR02] [SCH01] comme illustré sur la Figure IV.15. Une augmentation de la température entraîne une augmentation du lpm des électrons : par

conséquent les électrons acquièrent plus d'énergie entre deux collisions générant des décharges électriques caractérisées par des intensités plus élevées.

Quant à la réduction du nombre de décharges en fonction de la température, elle s'explique par le fait que la multiplication électronique dans l'espace interelectrodes sous des valeurs de températures élevées (faible densité) n'est pas suffisante pour déclencher plusieurs décharges.

IV.3.3.3 Effet de l'humidité

La variation de la tension de claquage en fonction de l'humidité sous conditions normales de température et de pression (distance interelectrodes fixe) est déduite de l'équation (IV.1) en remplaçant V_{air} par l'équation (IV.4).

L'humidité relative ne donne pas directement la quantité de vapeur d'eau dans l'air, mais seulement un rapport entre l'état de l'air considéré et celui de l'air saturé à la même température et à la même pression. Le diagramme de Mollier [Annexe 4] permet de faire correspondre à température et à taux d'humidité relative donnés, l'équivalent en humidité absolue. Les valeurs de l'humidité absolue correspondantes aux valeurs de l'humidité relative sont représentées dans le tableau suivant :

Humidité relative %	Humidité absolue g/m ³	Tension mesurée (V)	Tension calculée (V)
20	4	2270	2325
30	6,09	2360	2377
40	8,29	2400	2432
50	10,48	2430	2487
60	12,56	2490	2539
80	16,7	2680	2642
90	18	2700	2675

Tableau IV.6 Valeurs d'humidité déduites du diagramme de Mollier

Après avoir déduit la valeur de l'humidité absolue, la tension de claquage V_{air} qui tient compte de la variation d'humidité a été calculée d'après l'équation (IV.4).

La Figure IV.16 présente la variation de la TADP en fonction de l'humidité relative comprise entre 20% et 90% sous CNTP.

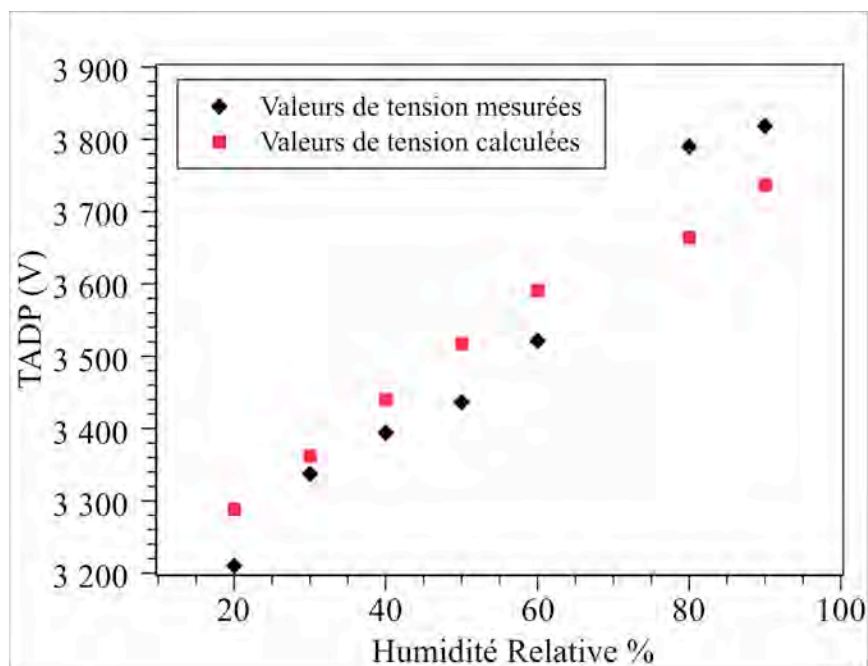


Figure IV.16 Variation de la tension d'apparition des décharges en fonction de l'humidité relative

En comparant les valeurs simulées et celles obtenues expérimentalement, nous remarquons une relativement bonne corrélation. Il est noté que plus l'humidité de l'air augmente, plus la tension disruptive augmente. En effet l'augmentation de l'humidité entraîne une augmentation du nombre des molécules d'eau présents dans l'air. Ces molécules jouent le rôle d'un gaz électronégatif induisant une augmentation de la tension de rupture de l'air [HEN00].

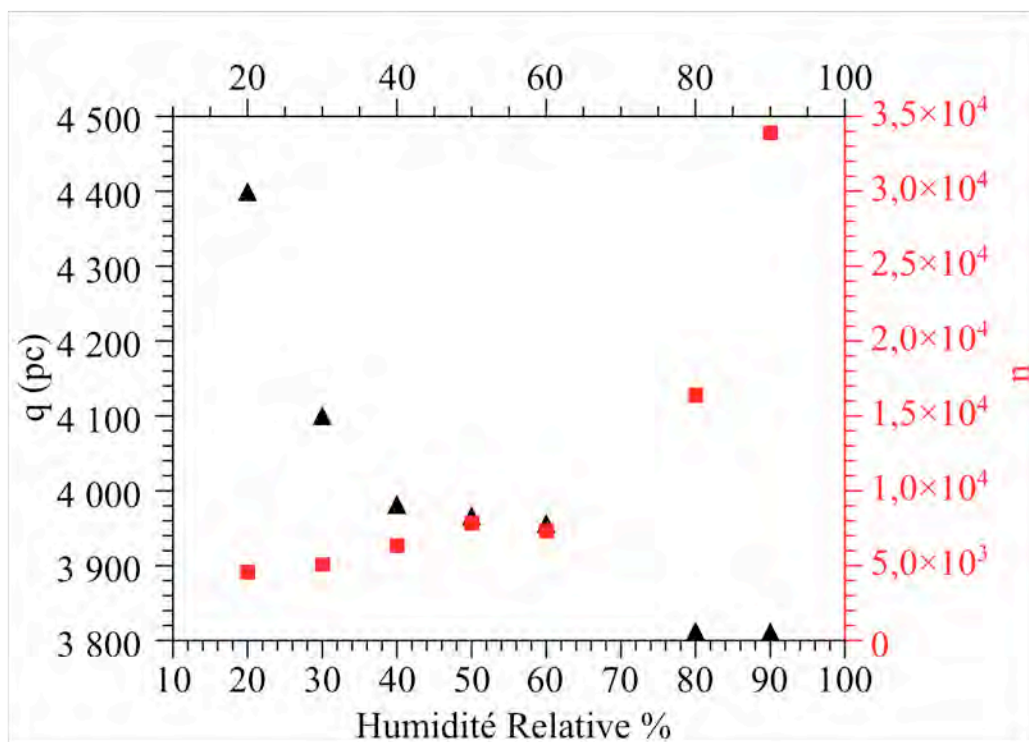


Figure IV.17 Variation du nombre et de l'intensité des décharges en fonction de l'humidité relative

L'intensité des décharges diminue avec l'augmentation de l'humidité comme illustré sur la Figure IV.17. Une diminution de l'humidité conduit à une diminution de la densité relative de l'air et par conséquent à une augmentation du *lpm* des électrons. En fait, l'humidité relative de l'air a été définie dans le chapitre I comme étant le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température.

$$\Phi (\%) = (P_{\text{vap}} / P_{\text{sat}}(T)) * 100$$

La pression de vapeur saturante « P_{sat} » est une fonction croissante de la température, donc une augmentation de température conduit à une diminution de l'humidité relative. Or la température est inversement proportionnelle à la densité de l'air, donc on peut considérer que la densité de l'air diminue en fonction de la diminution de l'humidité et par conséquent le *lpm* des électrons augmentent. Les électrons acquièrent alors plus d'énergie entre deux collisions générant ainsi des décharges caractérisées par des intensités plus élevées. La diminution du nombre de décharges en fonction de la diminution de l'humidité peut être expliquée par le fait que la multiplication électronique n'est pas suffisante pour déclencher plusieurs décharges. De plus, une forte augmentation du nombre de décharges après 60%HR est observée. Cette augmentation peut être reliée à la modification de la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolant à cause de la condensation des molécules d'eau. Le champ électrique sera renforcé autour de ces zones locales de condensation d'eau [FEN03], et devient plus élevé que le champ électrique seuil de déclenchement de la décharge, entraînant une augmentation du nombre de décharges.

IV.3.3.4 Effet de la distance

La variation de la tension de claquage en fonction de la distance interelectrodes, sous CNTP est déduite en remplaçant V_{air} par l'expression de la tension donnée par la loi de Paschen « équation (IV.2) ». Il est noté d'après la Figure IV.18 que les points mesurés et ceux calculés sont en bonne corrélation, et, comme on peut s'en douter, une augmentation de la distance induit une augmentation de la TADP.

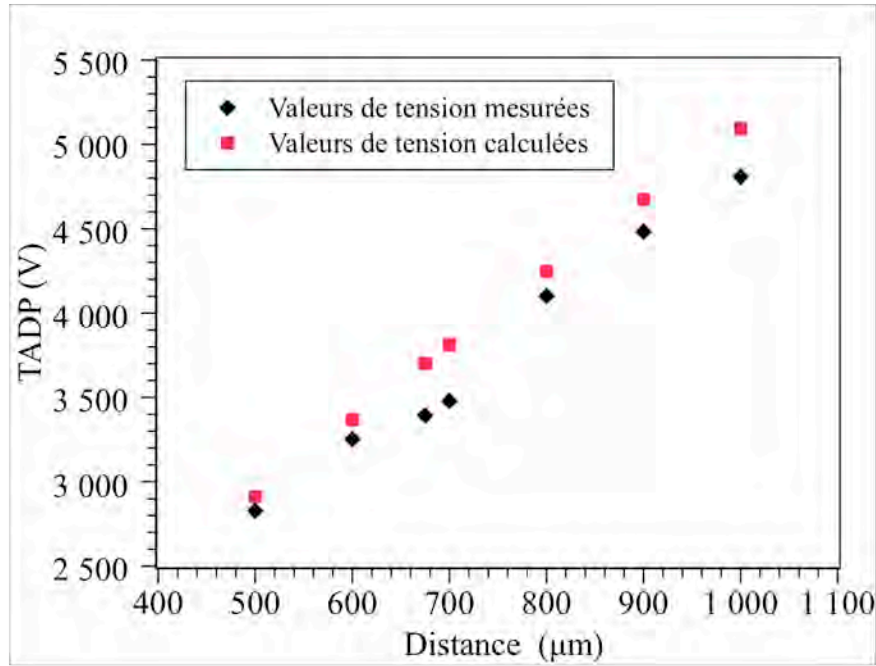


Figure IV.18 Variation de la tension d'apparition des décharges en fonction de la distance interélectrodes

Une augmentation de la distance s'accompagne d'une augmentation du nombre de décharges et de leur intensité comme le montre la Figure IV.19. A la pression atmosphérique, d'après l'équation (II.17) du chapitre II, en augmentant la distance, le champ électrique diminue et par conséquent le premier coefficient de Townsend diminue. Or le lpm est inversement proportionnel à α (équation (II.9) du chapitre II), donc une augmentation de distance est équivalente à une augmentation du lpm . Les électrons, traversant une distance plus élevée, acquièrent alors plus d'énergie entre deux collisions générant ainsi des décharges caractérisées par des intensités plus élevées. En augmentant la distance, les électrons traversant l'espace interélectrodes font beaucoup plus de collisions, générant ainsi plus de décharges.

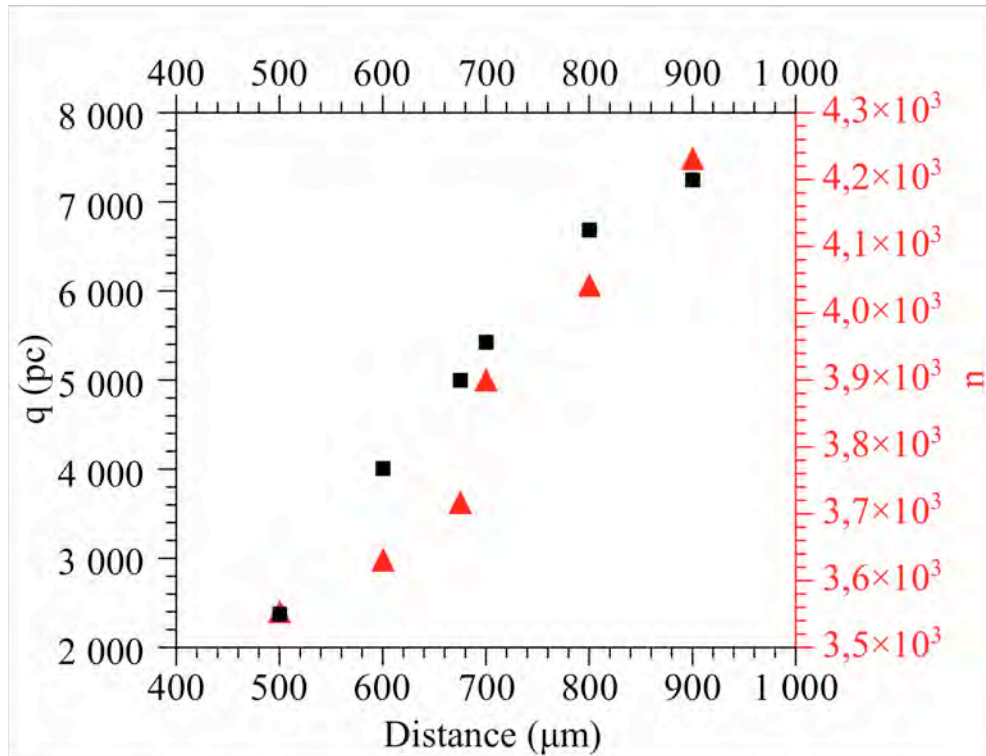


Figure IV.19 Variation du nombre et de l'intensité de la décharge en fonction de la distance

IV.3.3.5 Conclusion

Il a été démontré que la tension d'apparition des décharges, leur intensité et leur nombre varient en fonction de l'environnement.

La validité des différentes expressions exposées au paragraphe II.1.6.3 du chapitre II, permettant de calculer la TADP en fonction des différents paramètres est vérifiée dans le cas de nos résultats expérimentaux.

La variation de l'intensité des décharges et leur nombre en fonction des différents paramètres ont été expliqués en se référant au libre parcours moyen des électrons.

IV.3.4 Comparaison entre décharge à barrière diélectrique et décharge entre deux électrodes métalliques

La décharge est établie dans un gap d'air entre deux électrodes, l'une étant métallique de type pointe et l'autre, plane, est couverte par un diélectrique. Lors des expériences, la distance prise entre les deux électrodes est de 1mm. Pour déclencher la décharge, on applique une tension alternative (sinusoïdale) entre les deux électrodes, l'une d'entre elles étant reliée à la terre (voir Figure IV.20).

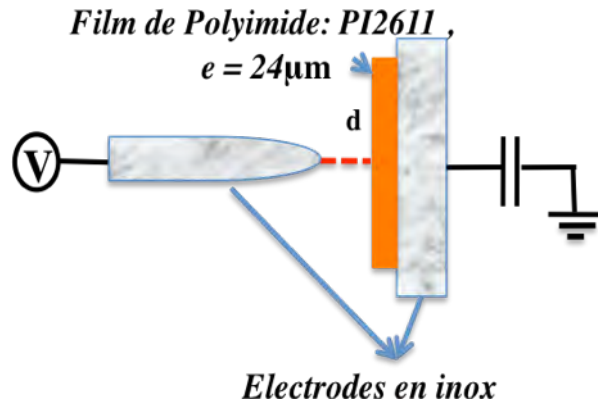


Figure IV.20 Dispositif expérimental

La tension de claquage ainsi que l'énergie dissipée au moment de l'apparition des décharges ont été mesurées pour une combinaison de température et de pression, à l'aide du dispositif expérimental détaillé dans le chapitre II.

IV.3.4.1 Tension d'apparition des décharges et énergie dissipée

Commençons par exploiter l'effet de la présence d'un film isolant sur la tension d'apparition des décharges ainsi que sur l'énergie dissipée. La Figure IV.20 présente l'évolution de la TADP dans les deux cas (métal/métal et métal/isolant) en fonction de la pression à 25°C.

En comparant les valeurs de la tension obtenues en présence d'une couche d'isolation avec celles obtenues en son absence, nous remarquons la présence d'une légère différence entre les deux cas plus particulièrement dans la partie à gauche du minimum de Paschen où la tension est légèrement plus élevée dans le cas métal/isolant.

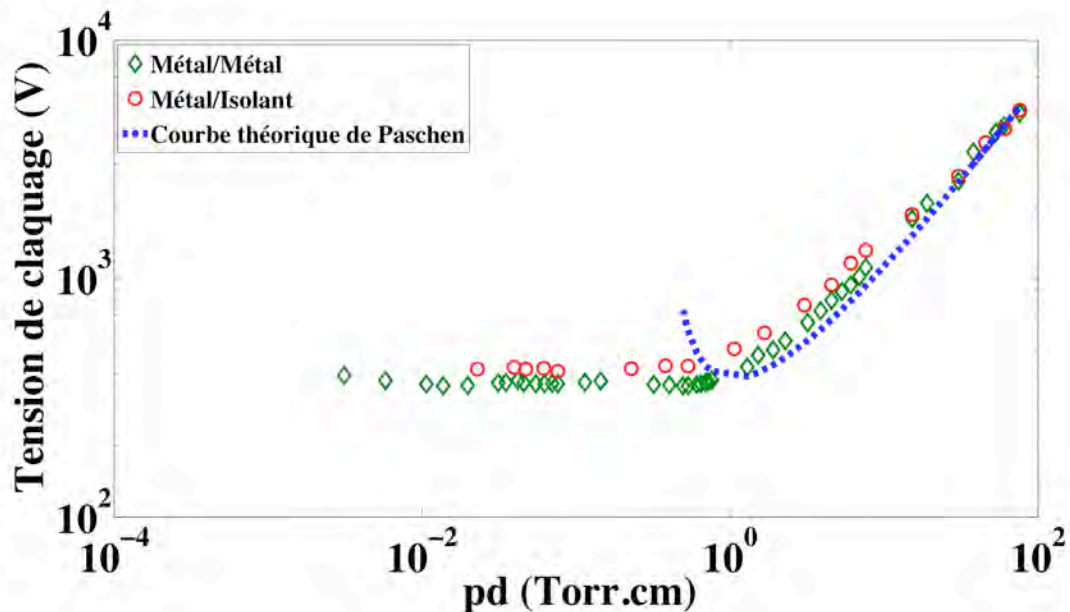


Figure IV.21 Variation de la tension de claquage en fonction de la pression dans le cas métal/métal et métal/isolant ($T=25^{\circ}\text{C}$, $d=1\text{mm}$)

Cette différence peut être expliquée en se référant au mécanisme responsable du développement de la décharge sous basse pression et à la température ambiante, qui est le mécanisme de Townsend. En fait, pour qu'une décharge soit entretenue, il faut qu'à la suite d'une avalanche un certain nombre d'électrons secondaires soient créés. Dans le cas du mécanisme de Townsend (sous basse pression) l'origine des électrons secondaires est la cathode qui sous bombardement ionique émet des électrons secondaires qui vont créer de nouvelles avalanches secondaires provoquant le claquage du gaz. Le déclenchement d'une décharge dépend donc de la nature de la cathode et par conséquent du coefficient secondaire de Townsend (γ). Le travail de sortie et le potentiel d'ionisation de la surface isolée sont élevés par rapport aux électrodes métalliques. Cela induit des faibles valeurs de γ . Aussi, la probabilité qu'un électron soit émis de la cathode (dans le cas d'un diélectrique) par bombardement ionique est inférieure à celle où la cathode est métallique [DRU40]. Ainsi en se référant au chapitre. II où il a été démontré que γ est inversement proportionnelle à la tension de claquage pour $P < P_{\min}$, cette légère différence entre la TADP du métal et celle du diélectrique peut être expliquée.

Examinons l'effet de la nature des électrodes sur l'énergie dissipée par les décharges. La Figure IV.22 présente la variation de l'énergie dissipée en fonction de la pression à température ambiante.

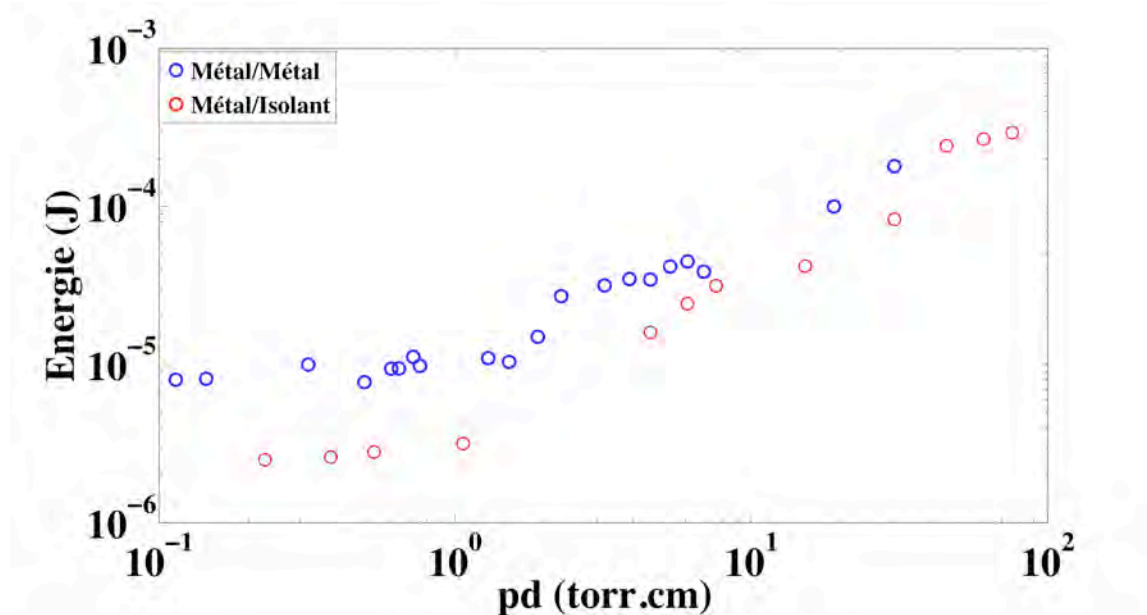


Figure IV.22 Variation de l'énergie dissipée en fonction de la pression. (T=25°C, p=760Torr, d=1mm)

Nous remarquons que les décharges dans le cas métal/métal sont beaucoup plus énergétiques que ceux dans le cas métal/isolant. En fait, si la décharge se produit entre deux parois conductrices, elle suit toujours une trajectoire unique et peut atteindre une énergie élevée; au contraire, si l'une des parois est isolante, cette paroi se comporte comme une capacité dont les armatures seraient constituées d'une électrode d'un côté, et du gaz de l'autre côté qui va limiter le courant, donc l'énergie dissipée. En effet, lors d'une décharge ce condensateur se charge ce

qui induit une diminution substantielle de la tension aux bornes du gaz, et le champ réduit vu par le gaz devient faible ; Par conséquent l'énergie dissipée par les décharges dans le gaz diminue. Dans ce cas là, la décharge est fragmentée en une pluie de décharges individuelles de faible énergie (ou effluves) qui dispersent la charge sur toute la surface.

IV.3.4.2 Mécanismes de claquage

La Figure IV.23 présente la variation de la tension de claquage en fonction de la pression pour différentes températures et pour une distance interélectrodes fixe. Nous remarquons que le comportement de la tension de claquage à gauche du minimum de Paschen dépend de la température : à 25°C, pour des pressions inférieures à la pression minimale la tension de claquage reste égale à la valeur minimale alors que pour 60°C la tension augmente de nouveau à gauche du minimum de Paschen.

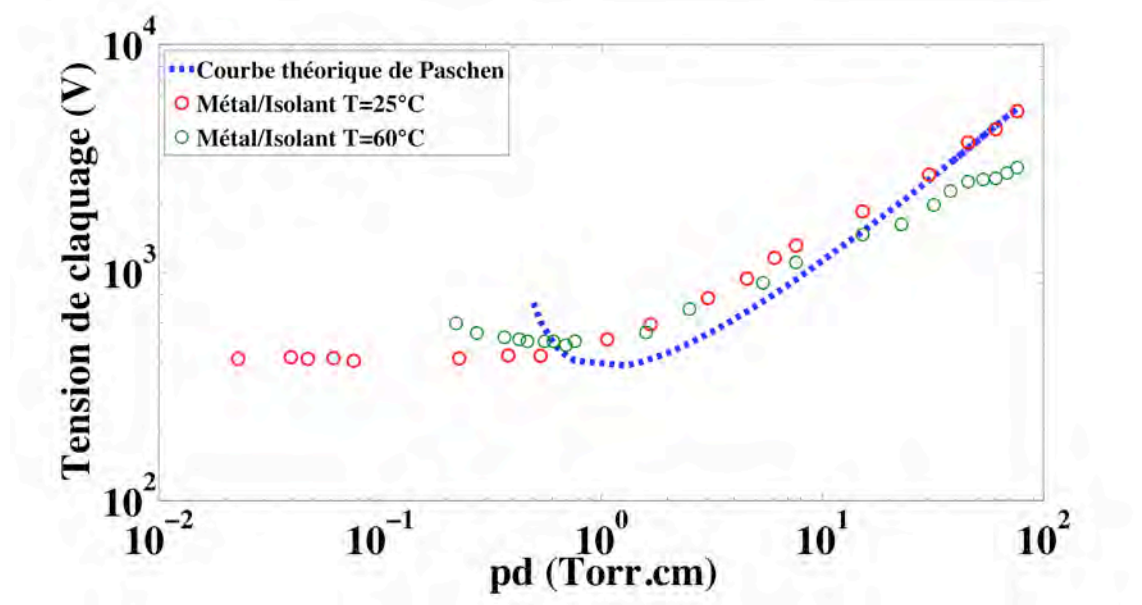


Figure IV.23 Variation de la tension de claquage en fonction de la pression, d=1mm.

Ce comportement de la tension est similaire à celui obtenu dans le cas métal/métal et décrit dans le chapitre II où la présence de l'un ou l'autre des deux mécanismes de claquage à gauche du minimum dépend de la température. Pour confirmer cette hypothèse des mesures d'énergie ont été réalisées. La Figure IV.24 présente la variation de l'énergie mesurée au moment de l'apparition des décharges en fonction de la pression pour deux températures différentes : 25°C et 60°C.

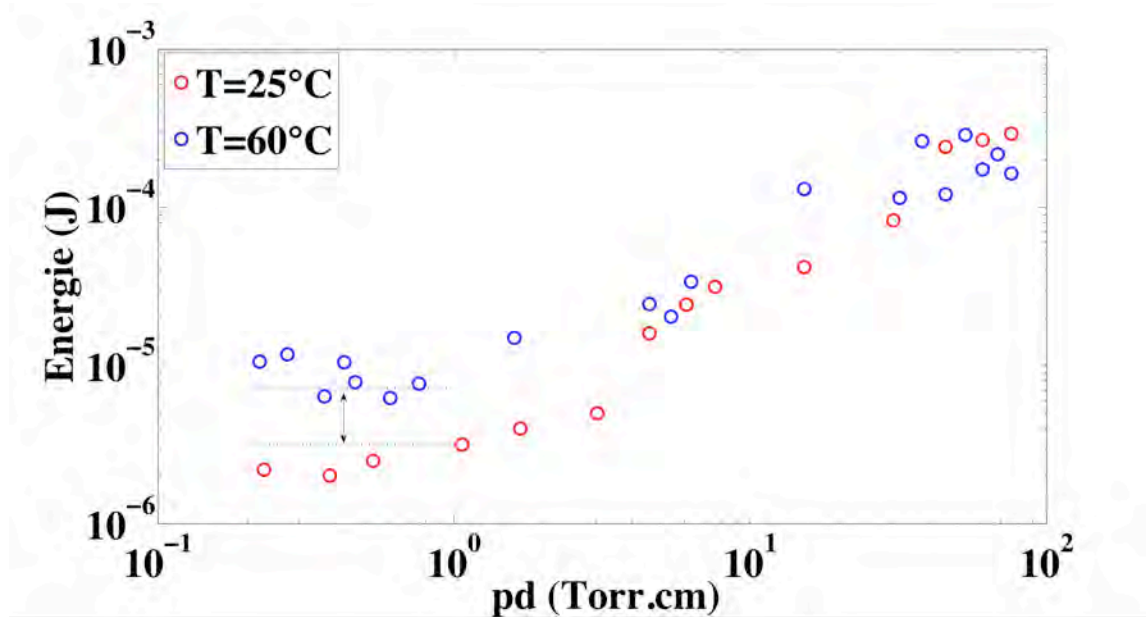


Figure IV.24 Variation de l'énergie dissipée en fonction de la pression, d=1mm.

A gauche du minimum de Paschen, au moins un ordre de grandeur entre les valeurs d'énergie mesurées à 25°C et à 60°C est observé. Ce qui confirme la présence de deux mécanismes de claquage différents comme évoqué dans le cas métal/métal. Mais est ce que les mêmes régimes de décharge qui sont responsables du développement de la décharge à gauche du minimum de Paschen, définis dans le cas métal/métal, sont mis en jeu? Pour pouvoir répondre à cette question nous sommes référés à la figure de Lissajous.

IV.3.4.3 Identifications du régime de décharge à l'aide de la figure de Lissajous

La Figure IV.26 montre les figures de Lissajous pour une même valeur de pression ($p=3,8\text{Torr}$) mais pour deux températures différentes: 25 ° C et 60 ° C. Une certaine différence dans la forme de la figure de Lissajous pour les deux températures est observée.

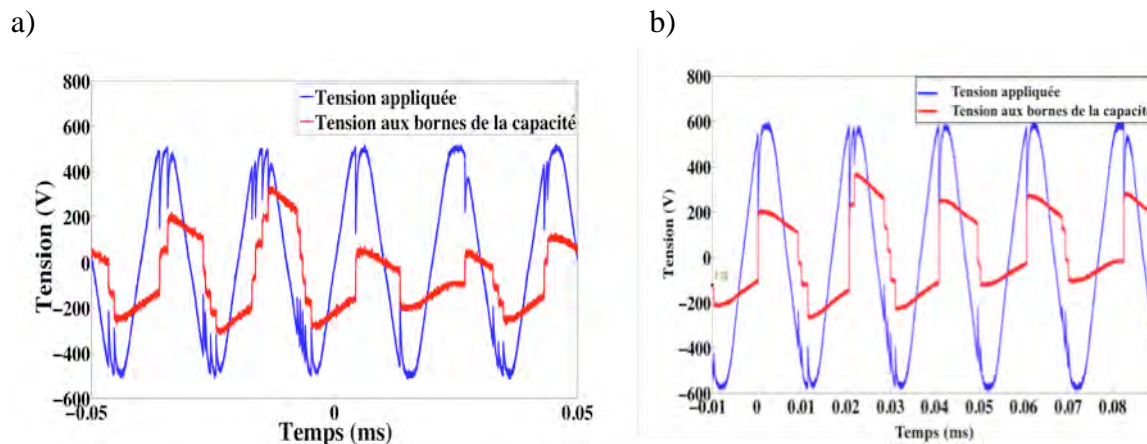


Figure IV.25 Observation de la tension appliquée aux bornes des deux électrodes et aux bornes de la capacité de mesure pour $p=3,8\text{Torr}$, $d=1\text{mm}$: a) $T=25^\circ\text{C}$, b) $T=60^\circ\text{C}$

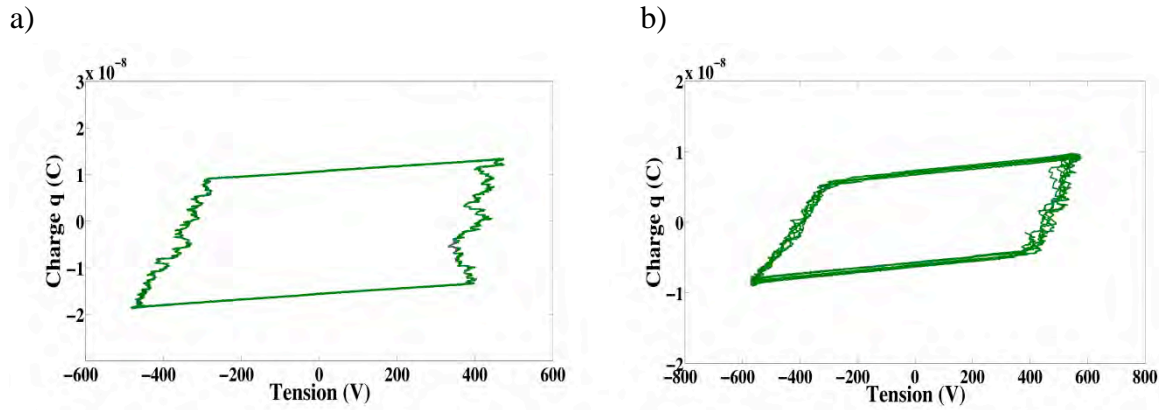


Figure IV.26 Figure de Lissajous pour $p=3,8\text{Torr}$, $d=1\text{mm}$: a) $T=25^\circ\text{C}$, b) $T=60^\circ\text{C}$

En comparant les deux acquisitions présentées sur la Figure IV.25a et la Figure IV.26a, nous remarquons que chaque décharge est représentée par un pas sur la partie gauche ou droite de la figure de Lissajous suivant qu'elle appartient à l'alternance négative ou positive respectivement. D'après la littérature cette figure de Lissajous se réfère à un régime de décharge connue par une décharge lumineuse [ZAN09] [HAO09].

Contrairement à la figure de Lissajous dans le cas ci-dessus, la figure de Lissajous pour une température supérieure à 25°C est un parallélogramme régulier indiquant la présence d'un autre régime de décharge : régime de décharge filamentaire (voir Figure IV.26b) [ZAN09].

Comme cela a été décrit dans le paragraphe IV.3.4.2 nous pouvons affirmer en conclusion, que ce sont les mêmes mécanismes de décharges qui sont mis en jeu dans le cas métal /isolant que dans le cas métal/métal.

Selon [BEY86], l'insertion d'une couche d'isolation n'affecte pas la formation de la décharge. Pour cette raison, les mêmes lois qui ont été décrites pour le développement de la décharge dans un gap d'air entre deux électrodes métalliques sont valables pour le développement d'une décharge dans un gap d'air ayant une interface gaz-diélectrique. Il nous reste à étudier maintenant la validité de la formule empirique proposée (paragraphe II.2.3.3, du chapitre II) dans le cas métal/métal au cas métal/isolant.

IV.3.4.4 Validité de la formule empirique

Pour calculer la tension de claquage entre le film isolant et l'électrode métallique, on va utiliser l'expression suivante :

$$V = V_{air} \left(1 + \frac{e}{d\epsilon_r} \right) \quad \text{IV.2}$$

e : épaisseur du film isolant : $24\mu\text{m}$

d : la largeur du gap d'air

ε_r : permittivité de l'isolant : 2,9.

V_{air} représente la tension de claquage calculée par la formule proposée :

$$V_{air} = \frac{V_{Paschen. mod}}{K_{Ti}} \text{ avec } K_{Ti} = a\delta^b \quad \text{IV.3}$$

La Figure IV.27 présente l'évolution de la tension de claquage en fonction de la pression pour une température de 60°C et une distance interélectrodes de 675µm entre l'isolant et l'électrode métallique. Une bonne corrélation, entre les valeurs mesurées et la courbe simulée d'après l'équation (IV.2), est obtenue.

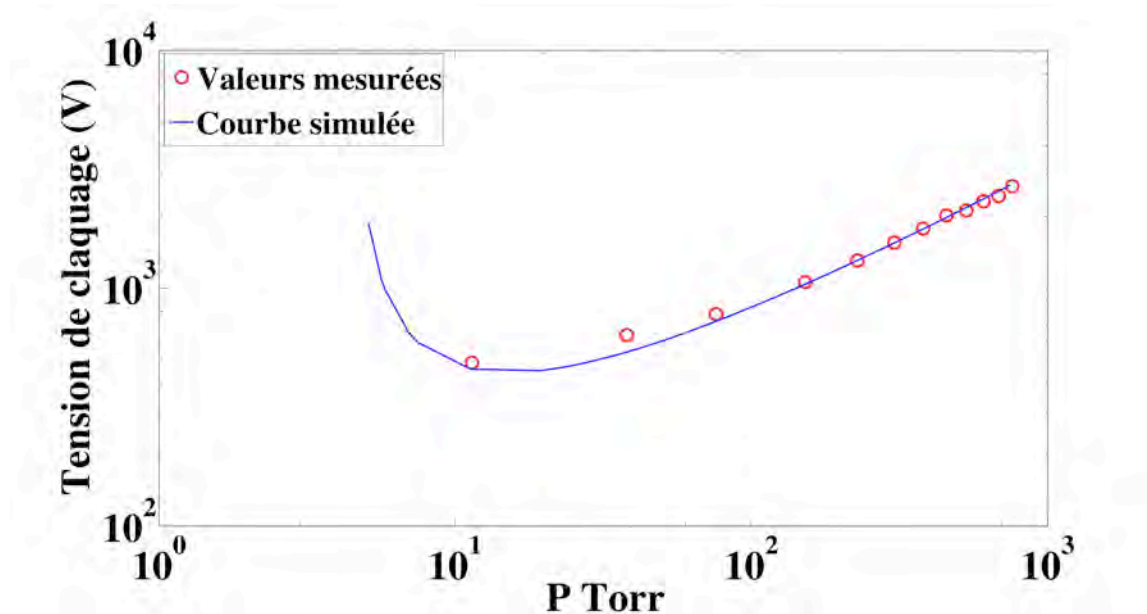


Figure IV.27 Variation de la tension de claquage en fonction de la pression : T=60°C, d= 675µm

On peut conclure que la formule empirique proposée dans le cas métal/métal est bien applicable dans le cas métal/isolant, et que par conséquent, la tension de claquage peut être déduite d'après l'équation (IV.2) ou l'équation (II.44) du chapitre II, pour des combinaisons de température et de pression quelle que soit la configuration appliquée (métal/métal ou métal/isolant).

IV.4 Conclusion

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons utilisé une analyse statistique pour l'identification des natures de défauts. Il a été démontré que chaque type de décharge est caractérisé par des diagrammes de décharge spécifiques. Puis, une étude a été menée sur l'impact de l'environnement aéronautique sur les caractéristiques d'une décharge à barrière diélectrique créée entre deux électrodes (pointe/plan). Il a été démontré que ses caractéristiques varient en fonction du paramètre appliqué, et cette variation a été expliquée en se référant au *lpm* des électrons. Cette étude nous servira dans le chapitre suivant pour déduire le paramètre qui influe le plus sur la durée de vie du polyimide. Enfin, une étude

comparative entre le cas métal/métal et le cas métal/isolant a été abordée. Il a été démontré que quelle que soit la nature des électrodes, les mêmes phénomènes physiques régissent le développement de la décharge.

CHAPITRE V. IMPACT DE L'ENVIRONNEMENT AERONAUTIQUE SUR LE VIEILLISSEMENT DU POLYIMIDE

Chapitre V Impact de l'environnement aéronautique sur le vieillissement du polyimide

Ce chapitre porte essentiellement sur deux parties.

L'objectif de la première partie est de rassembler les informations concernant les phénomènes physiques et chimiques qui seront nécessaires pour l'interprétation des résultats expérimentaux développés dans la deuxième partie de ce chapitre. Cette partie bibliographique portera essentiellement sur un type de vieillissement qui est le vieillissement électrique sous décharge partielle. Nous présenterons ses principaux effets sur les polymères isolants ainsi que les lois utilisées pour la prédiction de la durée de vie.

La deuxième partie est consacrée à l'étude du vieillissement sous DP du PI. Une étude sur l'influence des contraintes aéronautiques (P, T, Hr, U, d...) sur le vieillissement sous DP du polyimide BPDA/PDA sera présentée. Nous exploitons l'effet de ces paramètres sur le comportement de l'énergie dissipée par les décharges et sur la durée de vie du PI.

V.1 Vieillissement des polymères : Etat de l'art

Lorsqu'un système électrique est en service, son isolation est le siège de contraintes thermiques, électriques, mécaniques et enfin de contraintes liées à l'environnement. Au cours du temps, ces diverses contraintes engendrent des modifications irréversibles de l'isolant. D'où l'intérêt d'étudier le vieillissement des matériaux sous ces différentes contraintes pour tenter d'en prédire la durée de vie. Dans cette partie nous allons présenter un bref rappel des mécanismes de vieillissement, focalisé sur le vieillissement sous décharge partielle, qui fait l'objet de la deuxième partie.

V.1.1 Définition

Il y a de très nombreuses définitions possibles pour le vieillissement. On peut retenir celle proposée par l'Agence pour l'énergie nucléaire et reprise par l'Electric Power Research Institute (EPRI) : *processus par lequel les caractéristiques d'un système, structure ou composant (SSC) se modifient graduellement avec le temps ou l'utilisation*. Il y existe deux visions du vieillissement, une vision « vieillissement fiabiliste » caractérisée par des états tout ou rien : ou le matériel a perdu sa fonction (alors il est défaillant) ou il fonctionne (mais peut-être dégradé), et une vision « vieillissement physique » qui correspond à la lente et continue dégradation des propriétés des matériaux et des fonctions du matériel.

Deux catégories de vieillissement peuvent être distinguées :

Le vieillissement chimique

Un vieillissement chimique implique une modification de la structure chimique du polymère sous l'influence de l'environnement. Ces changements irréversibles dans le réseau moléculaire sont dus à des réactions chimiques.

Le vieillissement physique

A l'inverse d'un vieillissement chimique, le vieillissement physique d'un polymère n'entraîne aucune modification du squelette chimique du matériau. En revanche, l'évolution des propriétés est induite par l'évolution de la configuration spatiale des chaînes macromoléculaires du fait de l'interaction du polymère avec son environnement. En effet, sous l'action de nombreux facteurs (champ électrique, température, humidité, pression, radiations ...) les propriétés des isolants se dégradent dans le temps de manière réversible ou irréversible. Ce phénomène présente des effets défavorables pour le matériel électrique pouvant se manifester par l'apparition de défaillances associées à des phénomènes de rupture et de décharges électriques, et ceci sous des contraintes bien plus faibles que celles prises en compte à la conception.

V.1.2 Les mécanismes de vieillissement

La compréhension des mécanismes de vieillissement, de dégradation et de claquage des diélectriques ont occupé l'intérêt des scientifiques pendant des décennies en raison des applications larges des diélectriques. Plusieurs mécanismes sont à l'origine de la rupture des isolants: Ces mécanismes sont répertoriés dans la Figure V.1 selon la durée et la valeur du champ électrique appliqué.

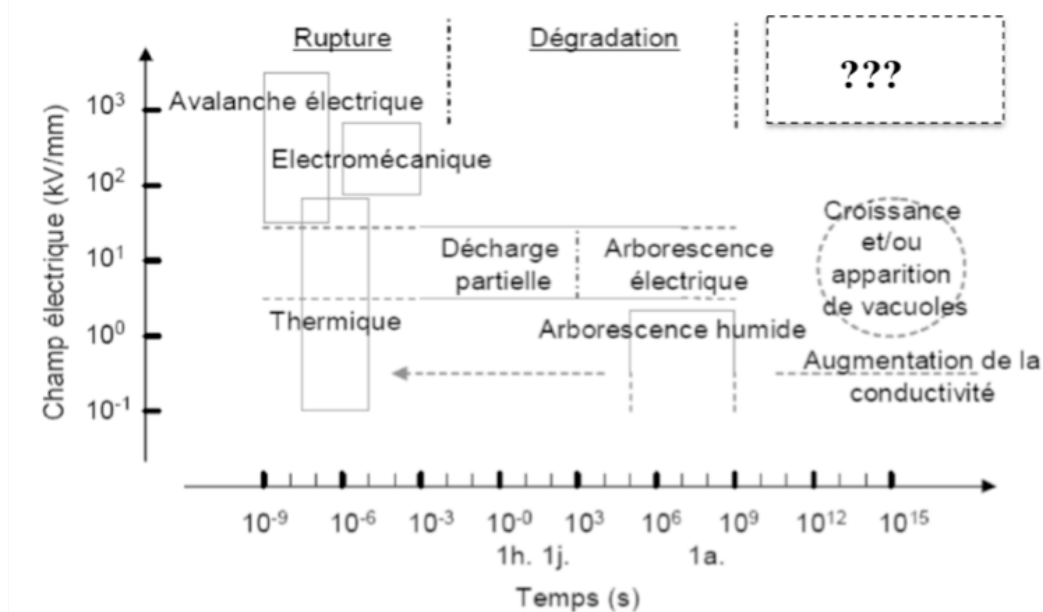


Figure V.1 Vieillissement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction du temps et des champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu [FOT07].

L'échelle de temps sur la Figure V.1 met en évidence un horizon temporel d'une vingtaine d'ordres de grandeur. On parle ainsi de rupture à court terme, ou claquage, plutôt liée à l'application de contraintes fortes, et de rupture à long terme, ou dégradation, plutôt liée à un vieillissement du matériau sous contraintes d'usage nominales.

La différence principale entre le claquage et la dégradation est que le claquage est un événement qui est soudain et catastrophique - l'isolation ne peut pas résister à la tension de service après claquage - tandis que la dégradation est un processus qui aura lieu durant une période de temps. Ces deux processus influent sur les propriétés de l'isolant telles qu'une diminution de sa rigidité diélectrique [FOT07].

Les mécanismes de claquage à court terme se produisent sur des temps courts, de l'ordre des microsecondes et sont distingués comme ayant une origine électrique, électromécanique ou thermique. En service, ces trois types de ruptures diélectriques sont normalement absents car les systèmes sont dimensionnés de manière à pouvoir supporter au moins les tensions nominales. En pratique, les défaillances proviennent du vieillissement, à long terme, du matériau sous l'action combinée du champ électrique et de l'environnement.

La dégradation est induite par les décharges partielles qui sont une conséquence habituelle du vieillissement des isolants polymères en champ alternatif, et/ou par les arborescences électriques qui sont une manifestation analogue du vieillissement sous champ, mais plus lente à s'établir. Ces deux processus n'interviennent qu'à champ élevé et de l'ordre de 10 kV/mm.

Les mécanismes représentés sur la figure par des points d'interrogation (« ??? ») sont présents pour de longues durées et pour des champs électriques élevés. D'après [FOT07] ils relèvent du vieillissement de type thermique, mécanique et électrique. Notre étude étant focalisée sur le vieillissement électrique et plus particulièrement celui dû au décharge partielle, nous allons présenter dans le paragraphe suivant une brève description des différents phénomènes qui apparaissent dans les SIE à cause de ce type de vieillissement.

V.1.3 Vieillissement électrique sous décharges partielles

Les Décharges Partielles (DP) correspondent à des ruptures d'isolation localisées soit à la surface, soit dans le volume du SIE. L'apparition de ce phénomène peut conduire à un vieillissement prématuré des matériaux isolants et donc du matériel électrique des systèmes embarqués. Dans les solides, la décharge partielle se localise dans une cavité, due à un défaut ou à une "érosion" du matériau. Ce défaut peut être présent sur une interface électrode-isolant ou dans le volume du matériau. L'origine de ces défauts, d'après C. Laurent et C. Mayoux [LAU92] [MAY92] est liée à plusieurs mécanismes tels que la dilatation thermique différentielle, les contraintes mécaniques excessives, ou bien un contrôle inapproprié du processus de fabrication.

V.1.3.1 Mécanisme de dégradation du diélectrique

L'interaction entre la DP et le diélectrique est complexe. Une partie de cette complexité est liée au fait que le diélectrique se modifie sous l'action des DP, et, dans le même temps, le mécanisme de DP est affecté par le vieillissement du diélectrique.

Considérons une cavité plane ou bien un gap entre deux électrodes couvertes par un diélectrique où l'oxygène, l'hydrogène et le carbone sont présents. La Figure V.2 présente un possible scénario du phénomène de vieillissement électrique: un isolant organique en début de service ($t = 0$ sur la Figure V.2) peut être avec ou sans défaut initial (cavités, trous...). Sous l'application d'une tension, il y a alors croissance ou apparition de vacuoles au sein de l'isolant ($t = t_1$ jusqu'à t_2). Ce phénomène n'est autre que le vieillissement électrique qui pourra conduire à la dégradation si des décharges prennent naissance dans une vacuole ($t = t_3$). Ces décharges interviennent lorsque la quantité des charges accumulées sur les bords de la cavité est suffisante pour qu'un électron germe présent dans la cavité puisse provoquer l'ionisation du gaz par un mécanisme d'avalanche électronique. L'érosion due à l'impact des charges sur la paroi contribue à la croissance du défaut, début de l'arborescence affectant ainsi les propriétés de l'isolant ($t = t_4$). Cette dégradation est susceptible à son tour de conduire l'isolant à sa fin de vie c'est-à-dire à une *rupture* ($t = t_5$).

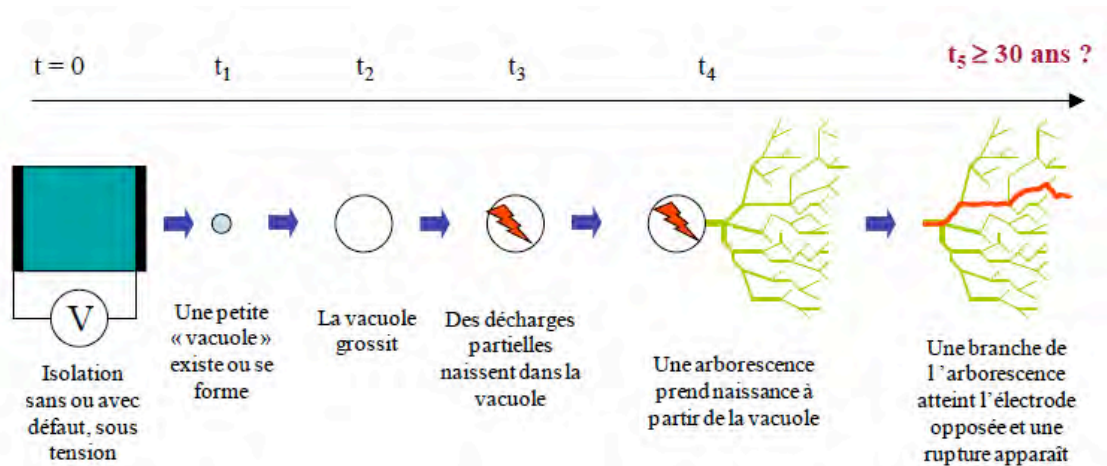


Figure V.2 Scénario classique de l'endommagement d'un isolant électrique [ROW07].

La destruction progressive par les décharges est due à la présence d'une variété d'espèces énergétiques dans le gaz : les molécules excitées, les ions, les rayonnements UV et les électrons énergétiques. Suivant l'espèce mise en jeu, l'impact d'une décharge sur un SI peut être divisé en deux types : soit de nature physique soit de nature chimique [MAR09] :

- **Nature physique** : les électrons et les avalanches d'ions entrent dans la matrice du polymère où ils se thermalisent. Ils transfèrent leur énergie au polymère, cassant ainsi les liaisons entre les molécules. Ce processus entraîne une érosion localisée, qui est généralement plus rapide dans les régions amorphes où la densité des molécules et les liaisons sont faibles.

- **Nature chimique** : des molécules d'ozone sont formées dans le gap d'air où l'avalanche se forme ; de faibles quantités d'acides ont été trouvées fréquemment sur les surfaces des diélectriques soumis à des décharges couronnes.

La dégradation de l'isolant induit par les décharges dépend de plus de l'origine de la décharge qui peut être soit interne, soit en surface :

- **Décharges internes** : elles sont générées principalement par des cavités d'air (ou autre gaz) inclus dans le polymère. Ces décharges se créent dans ces cavités avec ionisation cumulative du gaz causant la détérioration du polymère sous l'action, en particulier, de l'ozone ou d'oxydes d'azote.
- **Décharges de surface** (ou effets de contournement) : ces décharges superficielles sont plus agressives que les décharges internes. Leurs effets se traduisent généralement par une érosion par bombardement ionique et une dégradation chimique due aux espèces gazeuses actives provoquant une diminution des propriétés mécaniques et une augmentation des pertes diélectriques.

V.1.3.2 Réactions chimiques entre le gaz et le diélectrique

Les premières réactions chimiques qui se développent sous l'action des DP sont liées à la présence d'humidité et à la dissociation des molécules d'air. Ces réactions chimiques induisent la formation de nouvelles espèces chimiques de nature différente : liquide, gazeuse et/ou solide:

➤ **Sous-produits gazeux : (Gaseous by products)**

En prenant comme exemple LDPE et XLPE, les gaz produits sous l'action de DP sont pour la majeure partie le monoxyde et le dioxyde de carbone ainsi que l'hydrogène en une faible quantité. La formation de l'hydrogène est un résultat direct de l'interaction entre le polymère et l'énergie radiative de la décharge. L'oxydation d'une partie de la chaîne du polymère mène à la formation du dioxyde de carbone [WOL78] [WOL82].

➤ **Sous produits liquides : (Liquid by products)**

D'après Gamez Garcia [GAM87] si l'atmosphère contient de l'eau et du monoxyde de carbone, des gouttelettes liquides sont formées sur la surface du XLPE. L'un des effets les plus importants de la formation des sous produits liquides est l'augmentation de la conductivité de la surface exposée aux décharges.

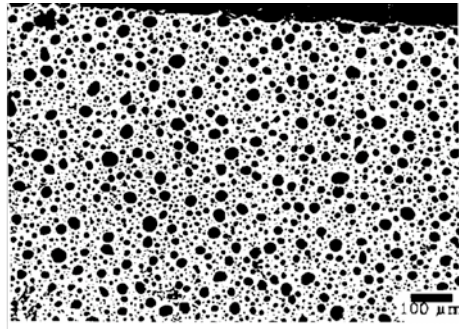


Figure V.3 Gouttes couvrant une surface époxy après une courte durée d'exposition sous DP [HUD90].

➤ Sous produits solides : (Solid by products)

Après un certain temps d'exposition aux DP, un dépôt local de sous produits solides est observé. Ces produits apparaissent sous forme de cristaux. En effet, il est amplement prouvé que les gouttelettes liquides déjà déposées sur la surface se cristallisent au point d'impact des DP [FOU95] [HOL92] [MOR95]. Ces cristaux seront formés uniquement dans une atmosphère dans laquelle H, C et O ont été présents [WOL78].

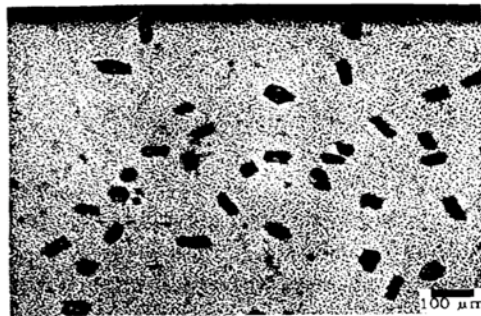


Figure V.4 Formation de cristaux sur une surface époxy après une longue durée d'exposition sous DP [HUD90].

Une arborescence électrique peut commencer à se développer à partir d'un point de renforcement du champ électrique (comme une aspérité à l'interface électrode - diélectrique) ou à partir d'une cavité gazeuse [SHI98]. Dans la plupart des cas, la croissance d'arborescence dans les cavités planes commence toujours à proximité des cristaux, où l'activité de la DP est localisée.

V.1.3.3 Impact du vieillissement sur les caractéristiques des décharges

V.1.3.3.1 Nombre de décharges

Il a été démontré par [TOK03] que les changements de la surface exposée aux décharges tout le long du processus de vieillissement influent sur les caractéristiques des décharges elles mêmes tels que leurs nombres. D'après la Figure V.5 on remarque qu'après 15 min d'exposition aux décharges, le nombre de décharges diminue. Cette diminution peut être

reliée à la formation d'une couche conductrice sur la surface du matériau diminuant temporairement l'activité des décharges. Après 104 min de vieillissement, une brusque augmentation du nombre de décharges est observée. Cette augmentation est liée à l'initiation d'une arborescence électrique qui mène à la rupture de l'isolant après une dizaine de minutes. En fonction du vieillissement, des cratères se forment sur la surface du matériau, et lorsque le vieillissement progresse, il y aura initiation et croissance des arborescences à partir de ces cratères. Ces arborescences croissent jusqu'à la rupture de l'isolant [TOK03].

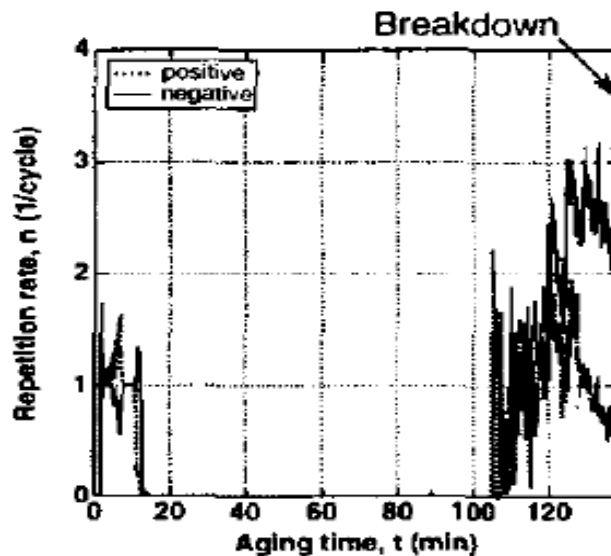


Figure V.5 Variation du nombre de décharges en fonction du temps de vieillissement dans une cavité présente dans un câble XLPE ($V=11,1$ kVrms) [TOK03].

V.1.3.3.2 Energie dissipée par les décharges

Plusieurs auteurs ont essayé de trouver une relation entre le vieillissement et l'énergie dissipée par les décharges. Certains ont considéré que l'énergie est affectée par le vieillissement alors que d'autres l'ont considérée comme un facteur ou un indicateur de vieillissement.

Florkowska *et al* [FLOR99] ont montré que le vieillissement sous décharges induit des variations du niveau de l'énergie et du régime de décharge mis en jeu tout le long du temps de vieillissement. En fait, les premières décharges sont caractérisées par des énergies élevées et le régime de décharge est de type « streamer ». Après un certain temps d'exposition sous décharges, des modifications de la surface surviennent comme par exemple une augmentation de la conductivité surfacique à cause de la formation des acides. Cette augmentation entraîne la diminution de l'énergie dissipée et le passage à un autre régime de décharge qui est de type « glow discharge ».

Sauers *et al* [SAU03] ont supposé que le claquage a lieu lorsqu'une certaine quantité totale d'énergie E_T est dissipée dans le défaut. La relation liant l'énergie totale au temps de vieillissement « L » est donnée par l'expression suivante :

$$E_T = PL \quad V.1$$

où P désigne la puissance dissipée qui, à son tour dépend de la tension appliquée « V ».

Brown *et al* [BRO04] ont relié le développement des arborescences dans les polymères à l'énergie dissipée. En effet, la croissance d'une arborescence nécessite l'évaporation d'un certain volume du polymère qui exige une énergie suffisante pour la coupure des chaînes du polymère.

Considérons le cas de la résine Epoxy formée par des molécules de DGEBA (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) : La masse molaire de chaque molécule M_w est de 340g, la densité du polymère ρ est de $1,12 \times 10^6 \text{ g/m}^3$. Si l'énergie nécessaire pour la coupure des liaisons est de 4 eV [CHA01], l'énergie de vaporisation par m^3 est donc :

$$P_v = \frac{M_w}{\rho} \times N_c \times 4eV \times A \times 1,6 \times 10^{-19} \quad V.2$$

où A est la constante d'Avogadro et N_c est le nombre de liaisons covalentes.

L'énergie de vaporisation nécessaire pour la croissance d'une arborescence est donc :

$$P_t = P_v V' \quad V.3$$

où V' désigne le volume occupé par l'arborescence.

En calculant le rapport entre l'énergie électrostatique dissipée et l'énergie de vaporisation, il a été démontré que l'énergie de vaporisation nécessaire pour la formation des arborescences est environ un vingtième de l'énergie électrostatique totale. L'énergie résiduelle est probablement dissipée sous forme de lumière, de chaleur...

V.1.4 Vieillissement sous contraintes aéronautiques

Le mécanisme de vieillissement ainsi que le changement des caractéristiques des décharges induit par le vieillissement présentés précédemment, ont été développés en considérant un environnement caractérisé par des conditions normales de température et de pression. Or, l'apparition récente des DP dans les SIE en avionique et due à l'augmentation du niveau de tension sur les nouvelles générations d'avions, a suscité un nouvel intérêt d'une meilleure compréhension de ces phénomènes dans les conditions aéronautiques. Nous allons présenter dans ce paragraphe les quelques travaux déjà réalisés sur ce sujet.

V.1.4.1 Pression

Rui *et al* [RUI10] ont étudié l'effet de la variation de la pression sur les caractéristiques d'une décharge sur plusieurs types d'échantillons (paires twistées, morceau de câble isolé). Ils ont montré qu'une diminution de pression induit une augmentation de l'intensité des décharges ainsi que de leur nombre mesurés au moment de leur apparition (voir Figure V.6). Cela amène à supposer que l'isolant peut se dégrader dans un temps plus court lorsqu'il fonctionne sous basse pression.

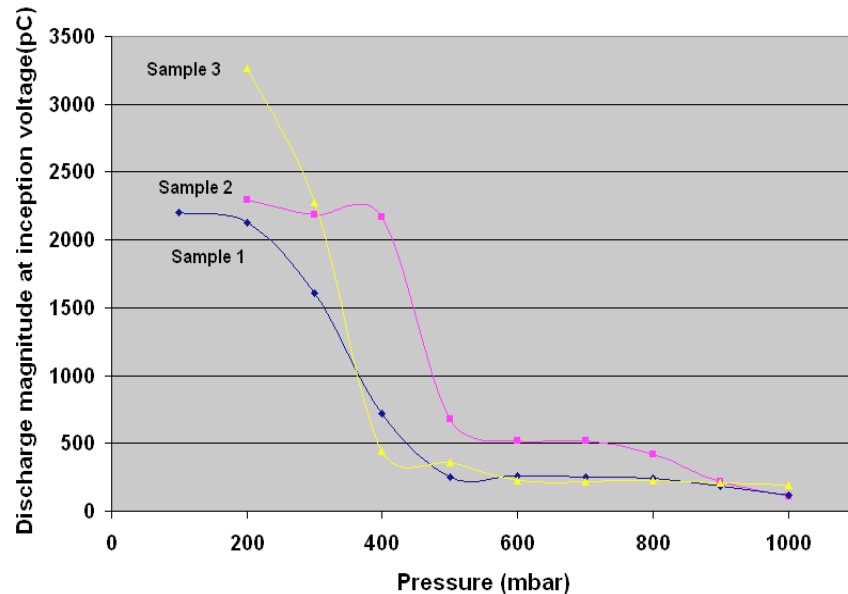


Figure V.6 Variation de l'intensité de la décharge en fonction de la pression au moment de l'apparition des décharges.

V.1.4.2 Humidité

Mcmahon *et al* [MCM63] ont démontré qu'une variation d'humidité influe sur la durée de vie des isolants et qu'une augmentation de l'humidité entraîne une augmentation de la durée de vie. La durée de vie du polyéthylène (PE) vieilli sous décharge couronne, sous des conditions humides est ainsi 20 fois plus longue que dans des conditions sèches (voir Figure V.7). Gamez garia *et al* [GAM90] ont montré que la formation des produits de dégradation sur la surface du diélectrique exposée sous décharge est très sensible à la présence des molécules d'eau dans le gaz. Des mesures réalisées sur des échantillons exposés sous décharge couronne dans l'air avec un taux d'humidité relative de 50 % ont montré l'existence des acides oxaliques sur la surface. La présence de ces acides fournit une couche conductrice qui entraîne une diminution de l'intensité du champ électrique et donc globalement de l'activité de la décharge. Par conséquent la surface du film se trouve protégée pendant une courte durée, ce qui explique l'augmentation de la durée de vie avec le taux d'humidité.

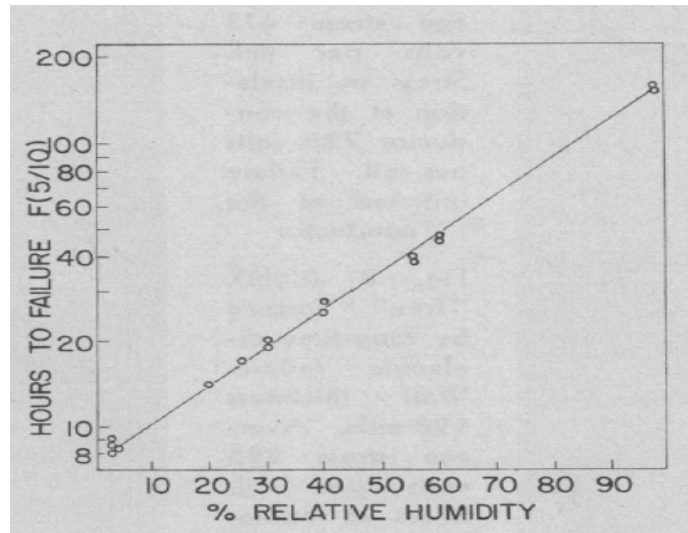


Figure V.7 Effet de la variation de l'humidité sur la durée de vie du polyéthylène vieilli sous décharge couronne ($E=8\text{kV/mm}$, $f=60\text{Hz}$) [MCM63].

V.1.4.3 Température

Di Lorenzo [LOR02] et Schifani [SCH01] ont étudié l'effet de la température sur les caractéristiques de la décharge. Ils ont observé une diminution du nombre de décharges et une augmentation de leur l'intensité avec l'augmentation de la température. La diminution du nombre de décharges est attribuée à une augmentation du travail de sortie du matériau, et l'augmentation de l'intensité à l'augmentation de la surface exposée aux décharges. Plusieurs explications sont avancées mais jusqu'à maintenant aucune n'a été validée expérimentalement. En ce qui concerne l'effet de la température sur la croissance des arborescences électriques, il est amplement prouvé que la croissance des arborescences est accélérée pour des valeurs de température élevées, et que par conséquent la durée de vie du matériau est considérablement réduite [CHA00] [AUC93].

Dès lors, la température peut être considérée comme une cause indirecte du vieillissement, qui influe sur l'activité de la DP plutôt que sur le taux de vieillissement.

V.1.4.4 Effet de la fréquence et de la tension

Il existe d'autres paramètres que ceux reliés à l'environnement qui influent sur la durée de vie des isolants, tels que la fréquence et la tension appliquée.

Fréquence

La relation entre la durée de vie et la fréquence de la tension appliquée est donnée par l'expression suivante :

$$L \propto f^{-m}$$

V.4

m est constante dans l'intervalle 1-60 kHz.

Fathi *et al* [FAT78] ont travaillé sur l'effet de la fréquence sur la durée de vie du polyimide et du polychlorure de vinyle (PVC). Ils ont démontré que ces deux grandeurs varient linéairement et qu'une augmentation de la fréquence induit une diminution de la durée de vie.

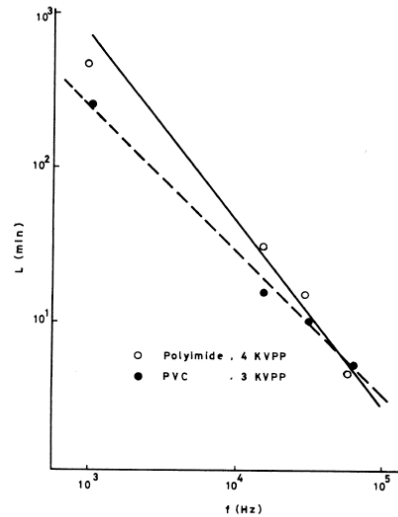


Figure V.8 Variation de la durée de vie en fonction de la fréquence.

Tension

Plusieurs études ont abordé l'impact de la tension sur la durée de vie des isolants. Par exemple Fathi *et al* [FAT78] ont étudié son effet sur la durée de vie du PI et du PVC. Ils ont démontré que la durée de vie de ces deux polymères diminue avec l'augmentation de la tension appliquée pour plusieurs valeurs de fréquence (voir Figure V.9). Ces courbes sont de plus caractérisées par une rupture de pente en un point qui dépend de la fréquence et divise la courbe en deux parties : dans la première, les valeurs de tension sont élevées et le claquage est intrinsèque alors que dans la deuxième, le claquage est dû à la présence des décharges partielles qui détruisent le matériau d'une manière progressive jusqu'au claquage.

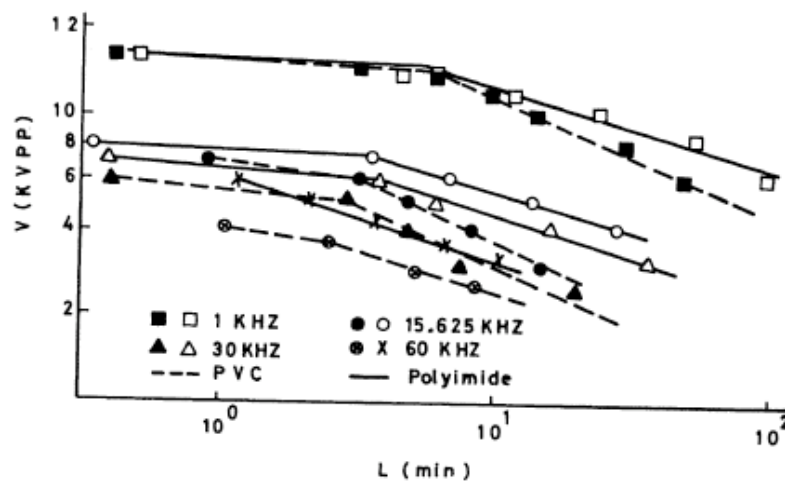


Figure V.9 Variation de la durée de vie en fonction de la tension pour plusieurs valeurs de fréquence.

V.1.5 Prédiction de la durée de vie

La compréhension des phénomènes de vieillissement thermique, mécanique et électrique des matériaux polymères préoccupe les experts de ce domaine depuis plusieurs décennies durant lesquelles ont été élaborés différents modèles décrivant le vieillissement ou définissant le « temps de vie » de ces matériaux. Nous présentons dans ce qui suit une présentation rapide des principaux modèles existants : la « loi de puissance », la « loi exponentielle », la « loi d'Arrhenius » et la « loi de Ramu ». Dans les trois premiers modèles, une seule contrainte est prise en considération : soit la contrainte électrique obtenue en faisant varier la tension à fréquence fixe, soit la contrainte thermique, alors que dans le dernier modèle la combinaison des deux contraintes électrique et thermique est considérée.

V.1.5.1 La Loi exponentielle

Cette loi a été proposée par Peek [PEE29] en 1923. C'est la représentation la plus couramment utilisée reliant la durée de vie du matériau à la tension appliquée. La forme initiale de ce modèle est donnée par [IEE87]:

$$L = c \exp(-kV) \quad \text{V.5}$$

$$\text{soit : } \log(L) = \log(c) - kV \quad \text{V.6}$$

où L est la durée de vie du matériau, V la tension appliquée, et c, k sont des constantes à déduire des données expérimentales.

V.1.5.2 La loi de puissance

La loi de puissance est l'un des modèles les plus fréquemment utilisés dans les études de vieillissement électrique. Il est décrit par la relation suivante [IEE87]:

$$L = K'V^{-n} \quad \text{V.7}$$

$$\log(L) = \log(K') - n \log(V) \quad \text{V.8}$$

où L est la durée de vie, V la tension appliquée, et n , k sont des constantes à déduire des données expérimentales.

De même, la validité de ce modèle est testée en traçant les valeurs expérimentales sur un graphique en échelles logarithmiques. Si une droite est obtenue alors l'hypothèse de l'utilisation de ce modèle est correcte.

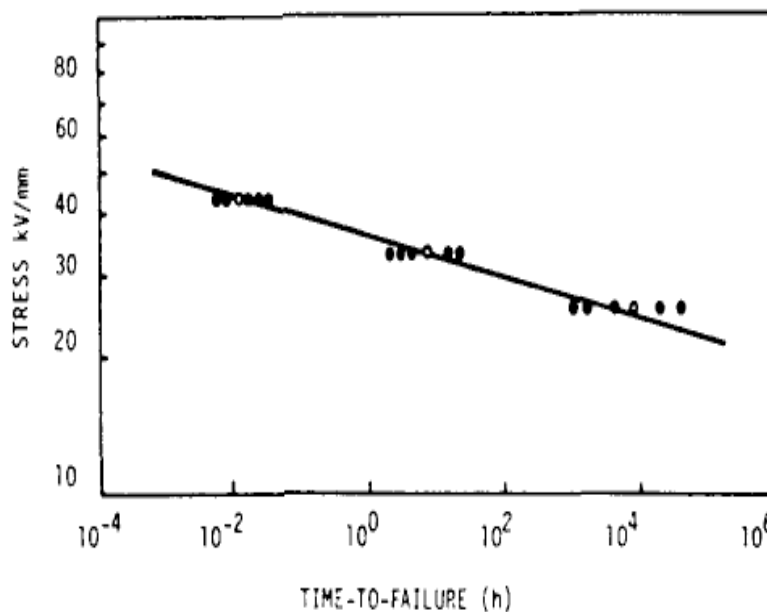


Figure V.10 Loi de puissance inverse, les cercles vides représentent une valeur moyenne de la durée de vie obtenue pour chaque valeur de tension appliquée [IEE87].

V.1.5.3 La loi d'Arrhenius

La majorité des études réalisées sur la dégradation thermique ont pour but, soit la prédiction de durée de vie des composites ou des polymères, soit l'extrapolation des propriétés après un temps donné d'utilisation. La prédiction de la durée de vie, ou l'extrapolation des propriétés, sont réalisées grâce à des essais de vieillissement accéléré menés dans des conditions sévères (température, pression ...) pendant des temps courts. Ces essais permettent de modéliser l'évolution des propriétés et de déterminer les paramètres cinétiques de la dégradation

thermique, dont l'énergie d'activation, afin d'extrapoler ces résultats pour des temps plus longs. La majorité des prévisions supposent une variation des propriétés avec la température selon une loi de type Arrhenius.

Supposons que nous soyons en présence d'un *mécanisme unique* conduisant à la disparition d'une espèce de concentration C , et dont la cinétique chimique peut s'écrire :

$$\frac{dC}{dt} = -RC^\alpha \text{ soit } \frac{dC}{C^\alpha} = -Rdt \quad \text{V.9}$$

R est la constante de vitesse et α l'ordre de la réaction.

L'équation d'Arrhenius nous donne la variation de la constante de vitesse R en fonction de la température absolue T :

$$R = R_0 \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \quad \text{V.10}$$

avec E_a est l'énergie d'activation de la réaction de dégradation considérée, et k_B est la constante de Boltzmann ($k_B=8,61.10^{-5}$ eV/K)

Notons qu'il s'agit d'une loi physique, portant sur la constante de vitesse d'un mécanisme élémentaire.

En intégrant l'équation différentielle ci-dessus, on obtient :

$$F(C) = Rt \quad \text{V.11}$$

La fonction $F(C)$ dépend essentiellement de l'ordre α et des conditions initiales.

Si l'on définit une **durée de vie** L comme étant le temps au bout duquel la concentration atteint une valeur limite C_L , on peut écrire :

$$L = \frac{F(C_L)}{R} \text{ soit } L = L_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad \text{V.12}$$

L_0 et E_a sont des constantes (E_a est une énergie d'activation qui varie entre 0,3 et 1,5eV pour la plupart des isolants [NEL04]) et T la température absolue.

En se basant sur cette relation, un grand nombre de tests de vieillissement ont été menés, amenant à la standardisation des principes de tests ainsi que des méthodes. La norme IEC 16 [IEC16] est un document de base dans lequel les principes et les méthodes de tests sont standardisés.

V.1.5.4 Loi de Ramu

Il est admis que la loi simple d'addition des contributions au vieillissement (électro-thermique = électrique + thermique) n'est pas valide. Le modèle développé par Eyring [GLA41] pour le couplage des contraintes est le suivant [CHA01] [BUD80] :

$$L = K(T)\exp(-BDT)V^{-n(T)} \quad \text{V.13}$$

où L est la durée de vie, V la tension appliquée, B est une constante thermique déduite de la loi d'Arrhenius, K et n sont deux constantes qui dépendent de la température :

$$K(T) = \exp(K_1 - K_2DT) \quad \text{V.14}$$

$$n(T) = n_1 - n_2DT \quad \text{V.15}$$

Avec n_1 et n_2 des constantes et $DT = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$

B, K_1 , K_2 , n_1 , n_2 sont des constantes qui peuvent être déterminées expérimentalement.

Ce modèle est représenté par le graphe de la Loi de puissance de la Figure V.11 [CYG89].

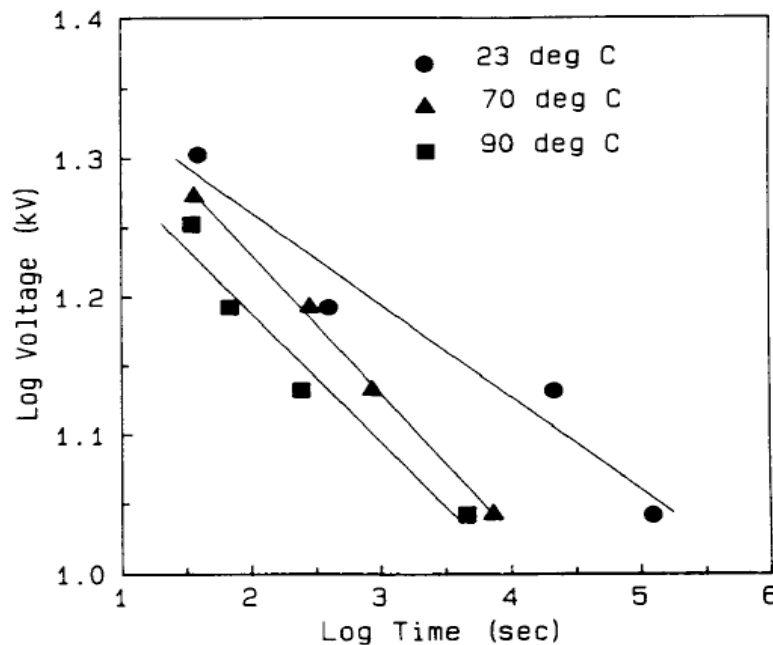


Figure V.11 Représentation de la durée de vie des systèmes d'huile de polypropylène suivant la loi de Ramu.

V.1.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons détaillé un état de l'art sur le vieillissement électrique sous DP. Les décharges partielles sont la conséquence de la présence des défauts dans la structure de l'isolant. Elles vont détériorer l'intérieur de ce défaut jusqu'à, à terme, engendrer le vieillissement et le claquage de l'isolant. Les mécanismes de dégradation et de l'impact de ce vieillissement sur les caractéristiques des décharges sous CNTP ont été présentés. L'effet des DP étant variable selon les différents paramètres atmosphériques où elles apparaissent, il est intéressant d'étudier l'effet de la variation de ces paramètres sur le vieillissement des isolants : c'est ce qui fera l'objectif de la deuxième partie de ce chapitre.

V.2 Vieillissement du Polyimide sous conditions aéronautiques

V.2.1 Influence des différents paramètres sur l'énergie des décharges et sur la durée de vie du matériau

Lors d'une décharge, les espèces créées ainsi que les ions et les électrons en interaction avec un isolant provoquent un changement de la morphologie de la surface exposée aux décharges. La nature de ces espèces chimiques dépend du gaz plasmagène, des paramètres atmosphériques et du régime de décharge. Dans cette partie, nous allons étudier l'interaction de la température, l'humidité, la tension, la distance interelectrodes et de deux régimes de décharges (régime de décharge luminescente à barrière diélectrique et décharge filamentaire), sur le comportement de l'énergie dissipée par les décharges dans un premier temps, puis sur la durée de vie du PI vieilli sous décharges partielles.

V.2.1.1 Protocole expérimental

Dans le but d'évaluer la durée de vie d'une isolation, on met en œuvre des essais à long terme: on fixe la tension V à des valeurs bien supérieures à la tension d'apparition des décharges, et pour chacune d'entre elles, on relève les valeurs de l'énergie dissipée mesurées chaque 30 secondes tout le long de la durée de vie du matériau, ainsi que le temps au bout duquel la rupture se manifeste : on trace ainsi (en quelques heures ou jours) une courbe de vie en fonction des différents paramètres, et une courbe d'énergie $E(t)$. Le dispositif expérimental utilisé pour mesurer l'énergie est celui détaillé dans le chapitre II. La durée avant le claquage est alors obtenue comme durée de vie [KAD83] [GJA97]. Dans notre étude, nous avons choisi $675\mu\text{m}$ comme distance séparant l'échantillon PI de $24\mu\text{m}$ d'épaisseur d'une pointe métallique ayant un rayon de courbure de 5mm . Un niveau de tension équivalent à $1,5 \times \text{TADP}$ a été appliqué, de manière à accélérer le vieillissement et obtenir des résultats sur une période d'étude plus limitée. Chaque expérience a été réalisée plusieurs fois afin de vérifier la reproductibilité des résultats expérimentaux.

V.2.1.2 Influence de l'environnement aéronautique sur le comportement de l'énergie dissipée

V.2.1.2.1 Résultats

La Figure V.12 présente la variation de l'énergie sur la durée du vieillissement pour différentes valeurs de tension et de distance.

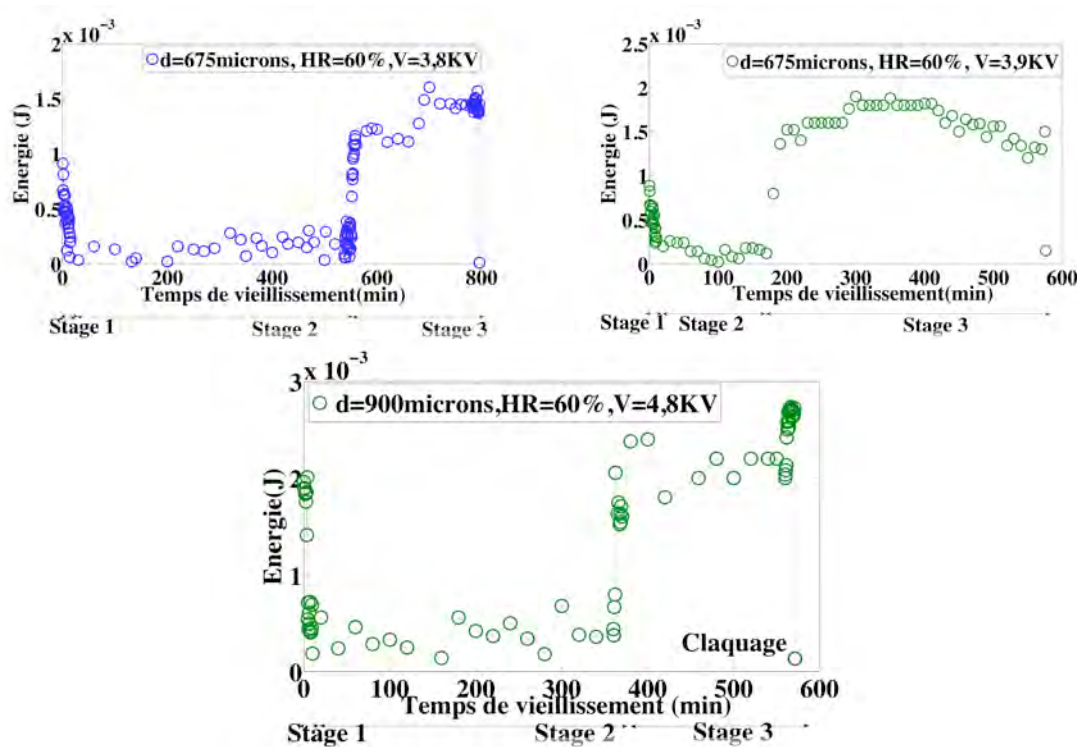


Figure V.12 Variation de l'énergie dissipée en fonction du temps de vieillissement sous humidité relative ambiante (HR = 60%), CNTP: a) $d=675\mu\text{m}$, $V=1,5 \times \text{TADP}$, b) $d=675\mu\text{m}$, $V= 3,9 \text{ kV}$, c) $d=900\mu\text{m}$, $V=1,5 \times \text{TADP}$

Sous CNTP, en faisant varier soit la distance, soit la tension, nous constatons une diminution de l'énergie dissipée par les décharges après quelques minutes de l'application de la tension. Puis une augmentation brusque de l'énergie apparaît après un certain temps de vieillissement jusqu'au claquage. En se basant sur ce profil de l'énergie, trois étapes de vieillissement peuvent être distinguées, ayant chacune leurs propres caractéristiques (voir Figure V.12). Le mécanisme de dégradation mis en jeu sera détaillé dans la partie V.2.1.2.4.

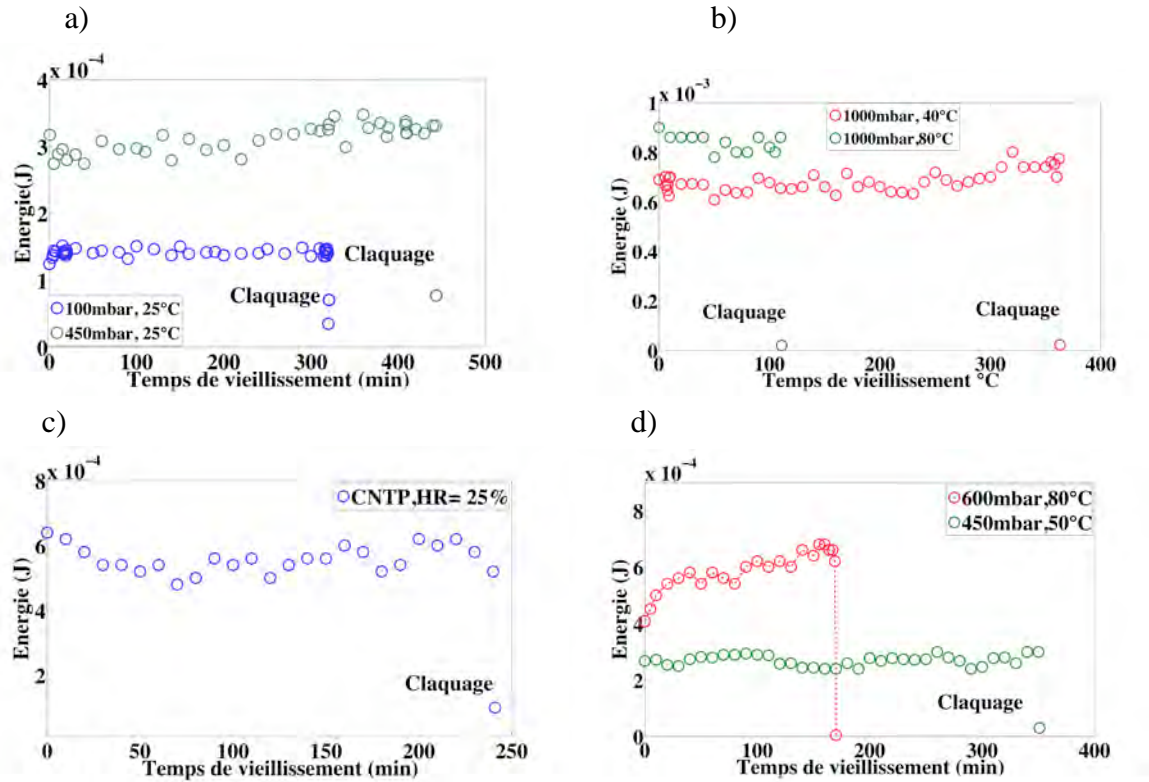


Figure V.13 Variation de l'énergie dissipée en fonction du temps de vieillissement ($d=675\mu\text{m}$, $V=1,5\times\text{TADP}$)
a) $T=25^\circ\text{C}$, p varie, b) $P=1000\text{mbar}$, T varie, c) CNTP, $\text{HR}=25\%$, d) p varie, T varie.

Par contre, sous faible pression, haute température et faible humidité, l'énergie reste quasiment constante sur la durée du vieillissement comme le montrent les Figures V.13a-b-c respectivement.

De même, pour des valeurs de température élevées, quelle que soit la valeur de pression appliquée, ce même comportement de l'énergie est obtenu comme illustré sur la Figure V.13d.

En conclusion, on voit donc clairement que la variation de l'énergie présente sur toute la durée du vieillissement deux comportements différents en fonction des paramètres environnementaux. Pour tenter d'expliquer cette différence de comportement, on s'est référé à la physique de la décharge développée dans le chapitre II.

V.2.1.2.2 Discussions

Dans le chapitre IV, il a été démontré que les caractéristiques de la décharge varient en fonction de l'environnement aéronautique. Nous pouvons donc supposer que cette variation de caractéristique influe sur l'énergie et donc sur le mécanisme de dégradation du matériau.

En observant les surfaces exposées sous décharges pour différentes conditions, nous remarquons que sous pression atmosphérique, température ambiante et humidité relative ambiante ($\text{HR}=60\%$), la surface des échantillons est caractérisée par la formation des zones

circulaires de dégradation (voir Figure V.14a) alors que sous faible pression et/ou température élevée, et pour des faibles valeurs d'humidité ces zones présentent une surface bien plus réduites (voir Figure V.14b, Figure V.15).

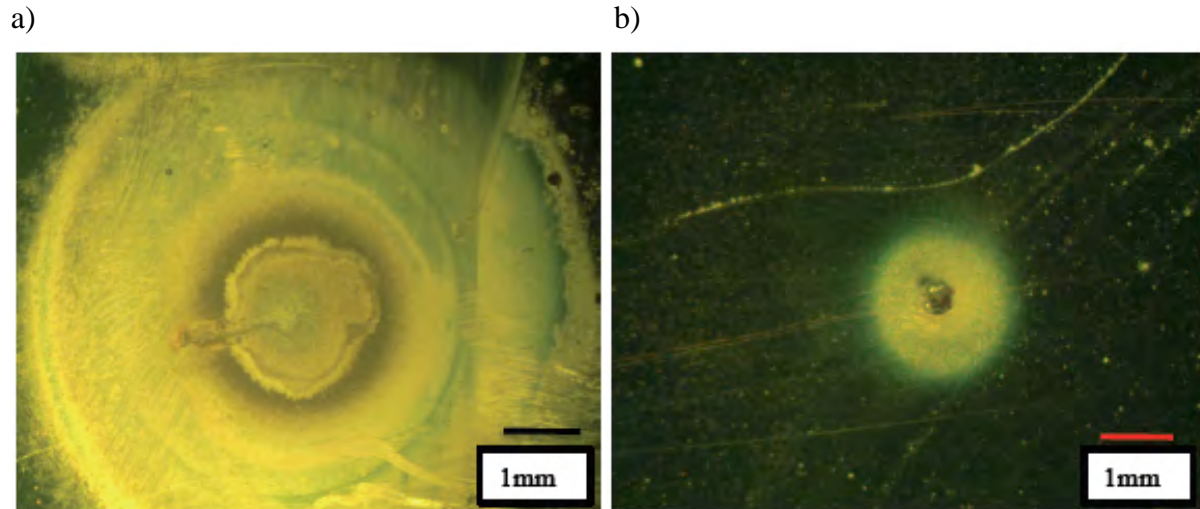


Figure V.14 Etat de la surface dégradée observé à la fin de la durée de vie des échantillons de PI (après la rupture des échantillons) : $T=25^{\circ}\text{C}$, humidité relative ambiante ($HR=60\%$), $V=1,5\times\text{TADP}$, a) $p=1000\text{mbar}$, b) $p=100\text{mbar}$.

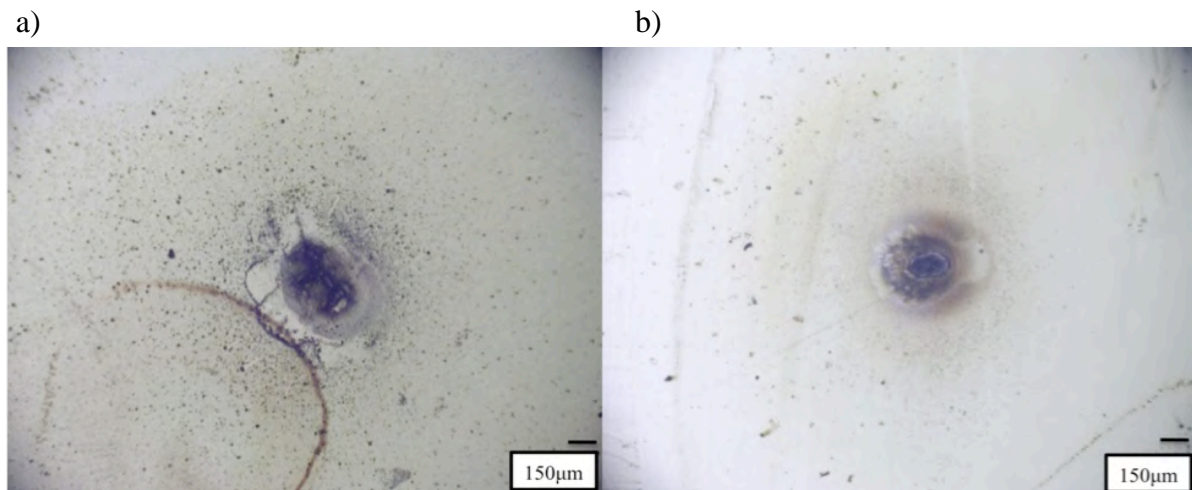


Figure V.15 Etat de la surface dégradée observé à la fin de la durée de vie des échantillons de PI (après la rupture des échantillons): $V=1,5\times\text{TADP}$, a) $p=600\text{mbar}$, $T=50^{\circ}\text{C}$, b) $p=1000\text{mbar}$, $T=25^{\circ}\text{C}$, $HR=20\%$

Le changement de la morphologie de la surface du diélectrique exposée aux décharges résulte principalement de l'interaction entre la surface et les particules énergétiques présentes dans le plasma [HUD92] [TAN86]. Cette interaction dépend d'une part de l'atmosphère de la décharge i.e de la nature des espèces chimiques créées [ICH93] et d'autre part de l'énergie transférée des électrons c'est à dire du régime de décharge, et donc de la physique de la décharge.

A la pression atmosphérique, la décharge à barrière diélectrique est caractérisée par un grand nombre de microdécharges, le régime de décharge est filamentaire. Cependant, sous faible pression, la décharge passe à un autre régime, celui de décharge lumineuse. Les

modifications que subit alors la surface du polymère diffèrent à cause de la différence de l'interaction de ces deux régimes de décharge avec la surface du PI au cours du temps de vieillissement (voir Figure V.14). Ces modifications dépendantes du régime de décharge et par conséquent de la pression appliquée, influent sur le comportement de l'énergie dissipée, de ce fait un changement de comportement est observé [FLO99] entre 100mbar et 1000mbar.

De plus la nature des molécules présentes dans l'atmosphère de la décharge varie en fonction des conditions atmosphériques. En effet, une faible pression et/ou une haute température sont équivalentes à des faibles taux d'humidité dans l'air. Dans ces cas là, les zones de dégradation observées sur la surface vieillie pour des valeurs d'humidité élevées, sont de dimensions réduites et l'énergie est caractérisée par des valeurs d'énergie presque constantes. Deux hypothèses peuvent alors être émises:

- La formation de ces zones est liée au taux de molécules d'eau présentes dans l'air.
- La diminution de l'énergie observée sous CNTP est reliée à la présence de ces zones de dégradation.

Afin de valider ces deux hypothèses, une analyse de la couche formée sur la surface vieillie sous décharges, sous CNTP, est envisagée.

V.2.1.2.3 Analyse de la surface vieillie sous décharges sous CNTP

Les propriétés de surface d'un matériau sont fortement liées aux espèces chimiques présentes à sa surface. Parmi les principales propriétés d'une surface se trouve sa mouillabilité, image de son énergie de surface, traduite par l'interaction d'un liquide avec sa surface. Cette propriété est liée aux groupes terminaux des molécules situés dans l'interface de la surface et qui sont soit hydrophiles soit hydrophobes. L'une des méthodes utilisées pour quantifier la mouillabilité d'une surface consiste à mesurer l'angle de contact à l'aide d'un instrument appelé goniomètre d'angle de contact. Cet angle correspond à l'angle à l'interface d'un liquide avec la surface solide. Il est mesuré en déposant une goutte d'eau sur la surface étudiée. La Figure V.16 présente la variation de l'angle de contact d'une goutte d'eau déposée sur une surface vierge de PI et une autre déposée après 90 min de vieillissement sous décharge, sous CNTP. La goutte d'eau déposée sur la surface de l'échantillon vierge conserve sa forme hémisphérique, tandis que celle déposée sur l'échantillon vieilli devient allongée sous la forme d'un arc. Une réduction de 20% de la valeur initiale de l'angle de contact, après 90 min d'exposition sous décharge, est observée.

Cette diminution montre que la mouillabilité du matériau a augmenté en fonction de la durée de l'exposition aux décharges. En effet, il est connu que l'exposition aux décharges dans l'air induit la formation d'une couche d'eau sur la surface vieillie la rendant hydrophile. Puis, sous l'impact de la décharge, l'eau se transforme en acide [SIG91].

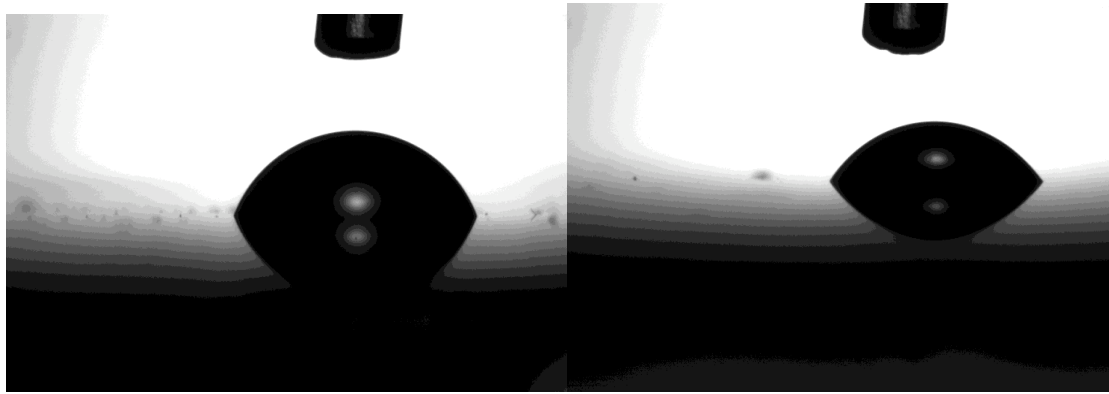


Figure V.16 Angle de contact sur a) un échantillon de PI vierge $\alpha=67^\circ$, b) après 90 min d'exposition sous décharge pour $t=25^\circ\text{C}$, $\alpha=54^\circ$

La formation de ces acides a été détectée en analysant la surface par spectroscopie infrarouge. En effet, d'après la Figure V.17 qui présente les spectres FTIR du PI avant et après vieillissement, on note l'apparition d'un nouveau pic, après vieillissement, près de 3000-3200 cm^{-1} correspondant à l'absorption du COOH [FUQ09]. D'après la littérature, ce sont des acides oxaliques de nature conductrice.

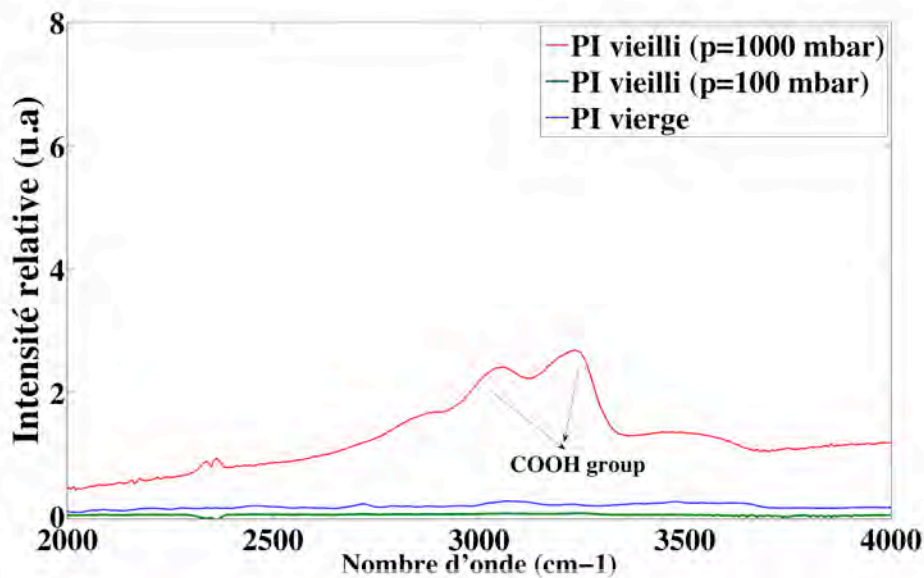
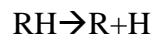


Figure V.17 Variation du spectre FTIR avec le vieillissement à 100 et 1000 mbar

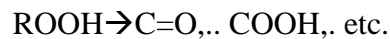
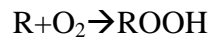
En revanche, pour la même mesure effectuée sur du PI vieilli sous 100mbar et un faible taux d'humidité, le spectre est caractérisé par l'absence du groupe COOH, ce qui confirme notre hypothèse sur la formation de la couche conductrice uniquement sous des taux d'humidité élevés.

V.2.1.2.4 Synthèse : mécanisme de dégradation sous CNTP

Après avoir identifié la nature de la surface formée ainsi que son origine, nous pouvons maintenant expliquer la relation entre la formation de cette couche et la variation de l'énergie observée sous CNTP. A cause de l'activité intense de la décharge, des réactions chimiques complexes auront lieu entre le plasma et la surface du polymère sans doute via un processus de créations des radicaux libres. Les ions, les électrons, les molécules excitées ainsi que le rayonnement UV créés par les décharges transfèrent une énergie suffisante à la surface du polymère pour casser les liaisons covalentes donnant ainsi naissance à la formation des radicaux [HUD93] [HUD90] [MOR90]:



Dans une atmosphère oxydante comme l'air, les radicaux de polymères sont connus de pouvoir réagir rapidement avec l'oxygène à travers les réactions du peroxyde [STR89] [BRI83] :



Il a été démontré par les mesures de spectroscopie Infrarouge et de l'angle de contact, que les produits de dégradation formés sont des acides carboxyliques (COOH), qui d'après la littérature sont de nature conductrice. Par conséquent la présence de ces acides induit une augmentation de la conductivité surfacique, et de ce fait les charges déposées sur la surface s'étalent sur une surface plus grande ce qui induit une diminution de la tension aux bornes du gap [HUD90]. Cette diminution de tension entraîne une diminution du nombre de décharges (voir Figure V.18), conduisant à une diminution de l'énergie dissipée (stage1).

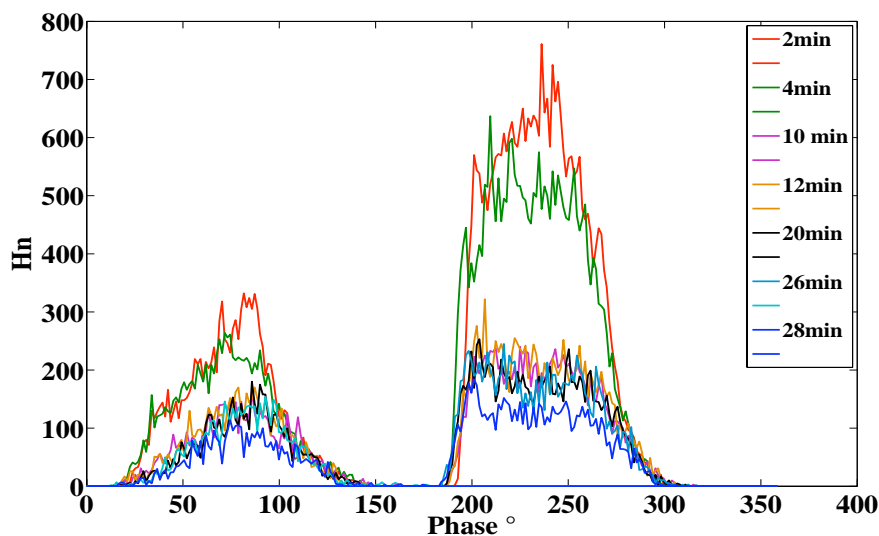


Figure V.18 Variation de la distribution du nombre de décharges en fonction du temps de vieillissement.

On se trouve alors face à une surtension plus faible que celle appliquée macroscopiquement ($=1,5 \times \text{TADP}$) et par conséquent une diminution temporaire de l'activité de la décharge [GUL92] est observée (stage 2).

Les gouttelettes liquides déjà déposées sur la surface seront cristallisées au point d'impact des DP [FOU95] [HOL92] [MOR95], formant ainsi des cristaux. Un renforcement du champ électrique aux bords de ces cristaux (pointus) aura lieu, augmentant localement l'activité des décharges et conduisant à une sévère dégradation et par suite à la formation des cratères. En fonction du vieillissement ces cratères croissent jusqu'à l'initiation d'une arborescence qui se manifeste par une augmentation de l'énergie détectée [TOK03] (stage 3). En effet, l'initiation et la croissance de cette arborescence permettent une accumulation facile des charges résiduelles qui donnent naissance à une brusque augmentation de l'intensité des décharges et par conséquent de l'énergie dissipée.

V.2.1.3 Influence de l'environnement aéronautique sur la durée de vie

Une étude sur la variation de la durée de vie en fonction des différents paramètres atmosphériques et de l'énergie moyenne dissipée est présentée dans cette partie.

V.2.1.3.1 Effet de la variation de la température

L'environnement d'un équipement impose non seulement une contrainte électrique sur ses composants d'isolation, mais aussi une contrainte thermique. Ainsi, le système d'isolation devient sujet d'un vieillissement dû à la combinaison du stress thermique et électrique.

Dans notre cas, la température est considérée comme une cause indirecte de vieillissement car le PI présente une bonne stabilité thermique jusqu'à 300°C dans l'air [KHA]; elle n'est pas considérée comme un facteur direct influençant le taux de vieillissement du matériau utilisé, mais plutôt l'activité de la décharge partielle elle-même comme déjà montré dans le paragraphe IV.3.3.2 du chapitre IV.

Les mesures de vieillissement ont été réalisées dans un intervalle de température allant de 25°C à 80 °C à la pression atmosphérique. Les tensions appliquées sur les échantillons pour différentes températures sont présentées dans le tableau suivant :

Température °C	25	40	50	60	80
Tension kV ($1,5 \times \text{TADP}$)	3,8	3,68	3,58	3,5	3,34

Tableau V.1 Valeurs de tensions appliquées en fonction de la température

La Figure V.19 montre la variation de la durée de vie et de l'énergie en fonction de la température.

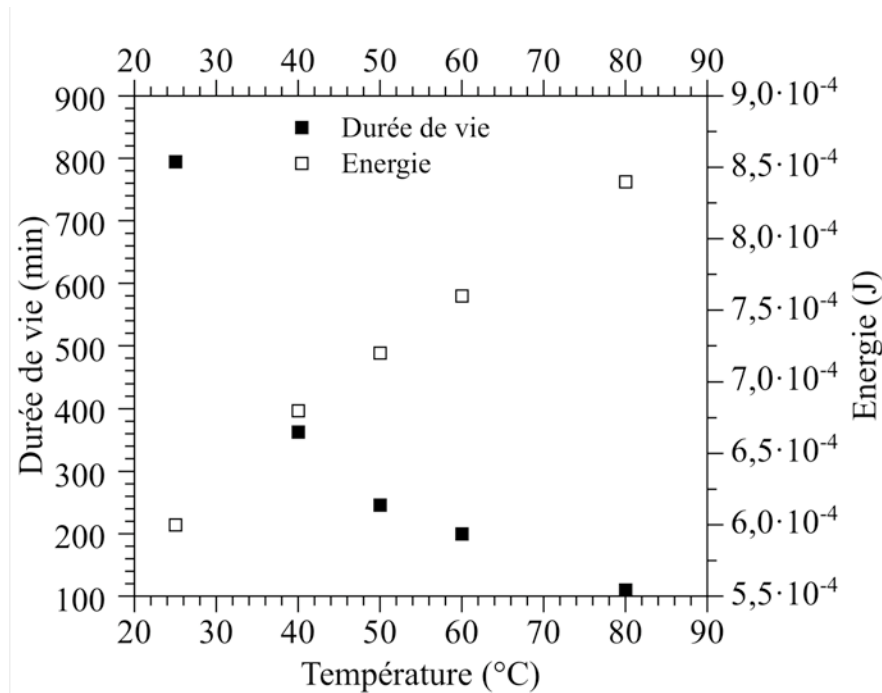


Figure V.19 Variation de la durée de vie en fonction de l'énergie moyenne dissipée pour différentes températures ($d=675\mu\text{m}$, $P=1000\text{ mbar}$)

On voit alors qu'une augmentation de température de 55°C entraîne une diminution de la durée de vie d'environ 80% et une augmentation de l'énergie moyenne d'environ 40%.

En augmentant la température, les décharges sont rendues plus énergétiques et par conséquent plus nocives, accélérant la vitesse de dégradation du matériau [GJA97], réduisant ainsi sa durée de vie. Cela peut être observé en examinant l'état de surface de trois échantillons vieillis sous décharges pendant la même durée (90min) sous différentes températures.

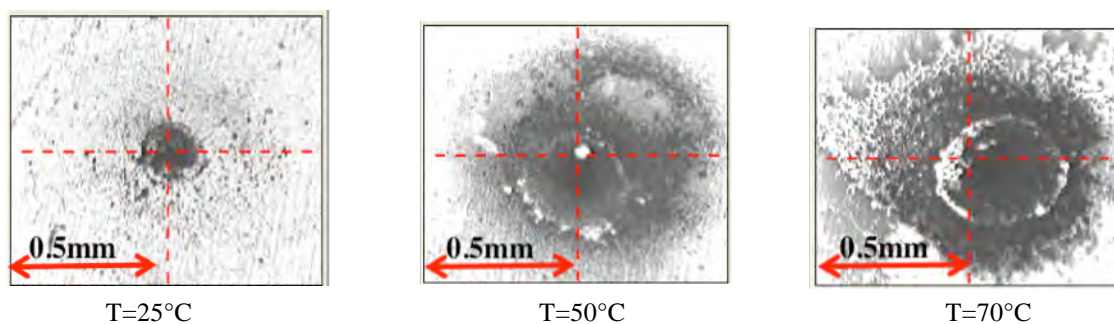


Figure V.20 L'état des surfaces du PI exposées sous décharges pour différentes températures.

La surface est de plus en plus dégradée avec l'augmentation de l'énergie induite par l'augmentation de la température.

V.2.1.3.2 Effet de la variation de la pression

Le fonctionnement des systèmes électriques, installés dans des zones dites «*non pressurisées*» à bord des avions, est soumis à d'incessantes variations des paramètres atmosphériques liées à l'altitude, d'où l'importance d'étudier le comportement de l'isolation électrique dans ces conditions. Dans cette partie on va traiter l'influence de la variation de la pression sur la durée de vie du PI.

Les tensions appliquées sur les échantillons pour différentes pressions sous température ambiante sont présentées dans le tableau suivant :

Pression mbar	100	450	600	1000
Tension kV	1,05	1,8	2,2	3,8

Tableau V.2 Les valeurs de tensions appliquées par rapport à la valeur de pression considérée

En diminuant la pression, on passe d'un régime de décharge filamentaire à un régime de décharge diffuse, où les décharges sont moins énergétiques que celles générées à pression atmosphérique. On doit donc s'attendre, a priori, à une augmentation de la durée de vie.

La Figure V.21 montre la variation de la durée de vie et de l'énergie en fonction de la pression.

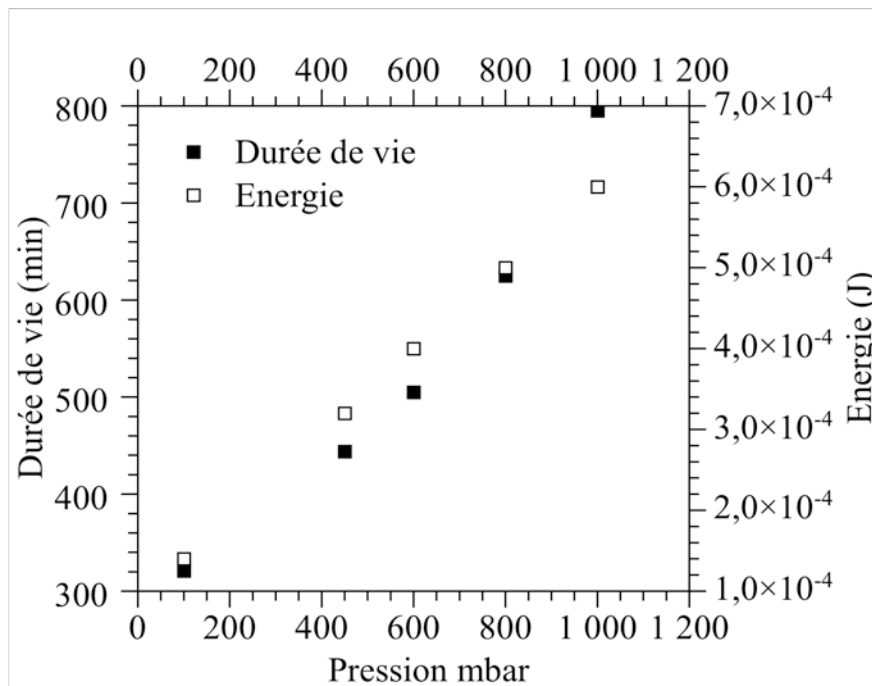


Figure V.21 Variation de la durée de vie en fonction de la pression et de l'énergie moyenne dissipée ($d=675\mu\text{m}$, $V=1,5 \times \text{TADP}$, $T=25^\circ\text{C}$)

D'après cette figure, nous pouvons remarquer que, contrairement à toutes attentes, durée de vie et énergie moyenne dissipée suivent la même croissance.

Ce comportement est lié à la variation de l'énergie observée en faisant varier la pression. Il a été démontré que sous basse pression (voir paragraphe V.2.1.2), l'énergie est quasiment constante sur toute la durée du vieillissement. Or en augmentant la pression une diminution de l'énergie apparaît, diminution reliée à la formation d'une couche de nature conductrice sur la surface vieillie sous DP. La présence des acides oxaliques sur la région affectée par les décharges fournit une certaine protection de courte durée à cause de leur nature conductrice [EUG68] renforçant ainsi la durée de vie [DEJ93]. En conclusion, en augmentant la pression, même si les décharges deviennent plus énergétiques, la durée de vie du PI augmente.

V.2.1.3.3 Effet combiné de la température et de la pression

Lors de son fonctionnement, l'équipement est soumis à des contraintes environnementales différentes selon sa localisation. Il a été démontré dans le chapitre II que le cas le plus critique pour la tension d'amorçage des décharges est la combinaison d'un environnement dépressurisé avec une température ambiante élevée. Un environnement de ce type est observé à proximité du réacteur [SOL05]. Dans cette partie, nous allons présenter l'impact d'une combinaison température pression sur la durée de vie du PI.

La Figure V.22 représente pour une température donnée, la variation de la durée de vie et de l'énergie en fonction de la pression.

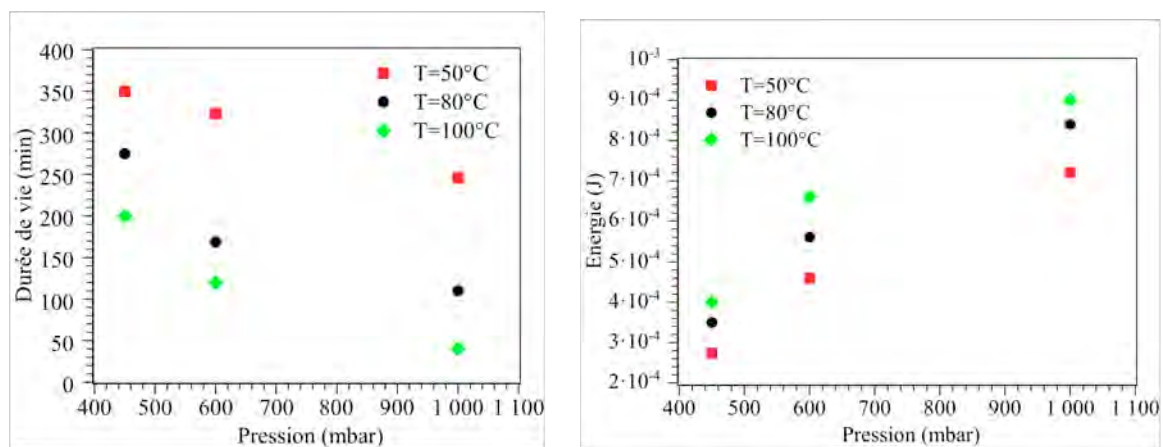


Figure V.22 Variation de la a) durée de vie du PI, et de la b) l'énergie moyenne dissipée, pour différentes valeurs de température et de pression ($d=675\mu\text{m}$, $V=1,5\times\text{TADP}$).

La durée de vie diminue de 30% pour 50°C, 60% pour 80°C et 80% pour les 100°C, lorsque la pression augmente de 450 à 1000mbar, alors que l'énergie augmente de 38% pour 50°C, 41% pour 80°C et 44% pour 100°C.

Ces résultats semblent en contradiction avec les résultats précédents. Toutefois, il faut considérer d'une part que l'humidité présente dans l'air diminue avec l'accroissement de la température, et que d'autre part la formation d'une couche conductrice, renforçant la durée de vie, est liée à la présence d'humidité. Par conséquent l'amélioration de la durée de vie avec la pression observée sous 25°C, et liée à la formation d'une couche conductrice ne sera plus valable dans ces conditions. En effet pour des valeurs de températures élevées (donc faibles

valeurs humidité) quelle que soit la pression appliquée, le même comportement de l'énergie est obtenu; celui caractérisé par des valeurs d'énergie constantes (voir Figure V.13b et 13d) traduisant l'absence de la couche conductrice. Sur ces considérations, il relève alors que le facteur qui influe le plus sur la durée de vie est l'énergie. Donc une variation de pression sous des températures élevées entraîne une augmentation de l'énergie et par conséquent une diminution de la durée de vie.

V.2.1.3.4 Effet de la variation de l'humidité

La Figure V.23 présente la variation de la durée de vie en fonction de l'énergie et de l'humidité. L'augmentation du taux d'humidité relative se traduit par une augmentation de la durée de vie bien que les décharges soient plus énergétiques. Comme nous l'avons déjà indiqué, la raison de ce résultat est d'une part le développement sur la surface vieillie, d'une couche conductrice qui diminue l'activité des décharges [EUG68], d'autre part c'est la présence des molécules d'eau sur la surface qui vont ralentir les particules chargées qui viennent bombarder la surface du diélectrique, réduisant ainsi leur impact [FOU95].

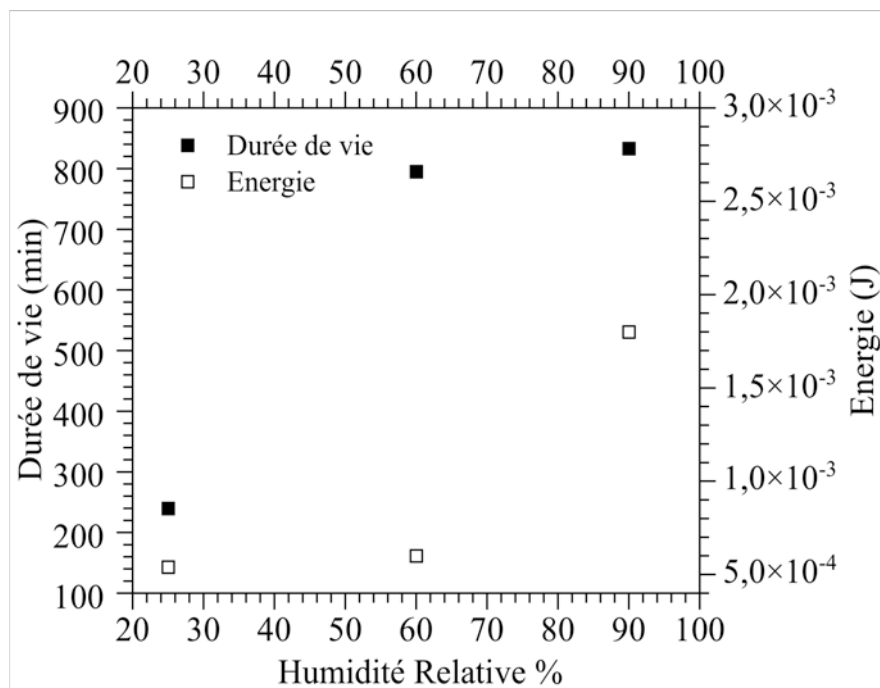


Figure V.23 Variation de la durée de vie et de l'énergie moyenne en fonction de l'humidité, sous CNTP (HR=25%, V=3,4kV ; HR=90%, V=4,1kV).

V.2.1.3.5 Effet de la variation de la distance et de la tension

L'effet des différents paramètres atmosphériques sur le comportement de l'énergie et sur la durée de vie de PI a été exploité, mais il existe d'autres paramètres qui influent sur la durée de vie tels que la variation de la distance d'un gap d'air séparant un câble et un plan de masse et

la tension appliquée. Nous allons présenter dans ce paragraphe l'effet de ces paramètres sur la durée de vie.

A- Durée de vie du matériau en fonction de la distance

Différentes distances sont considérées entre les échantillons de PI et l'électrode métallique. La tension appliquée est équivalente à 1,5 de la tension d'apparition des décharges, ce qui conduit quasiment à un champ constant, et les essais sont réalisés sous des CNTP.

Distance μm	500	600	675	800	900
Tension kV	3	3,53	3,8	4,3	4,8

Tableau V.3 Valeurs de tensions appliquées par rapport à la valeur de la distance considérée

La Figure V.24 présente la variation de la durée de vie du matériau et de l'énergie en fonction de la distance.

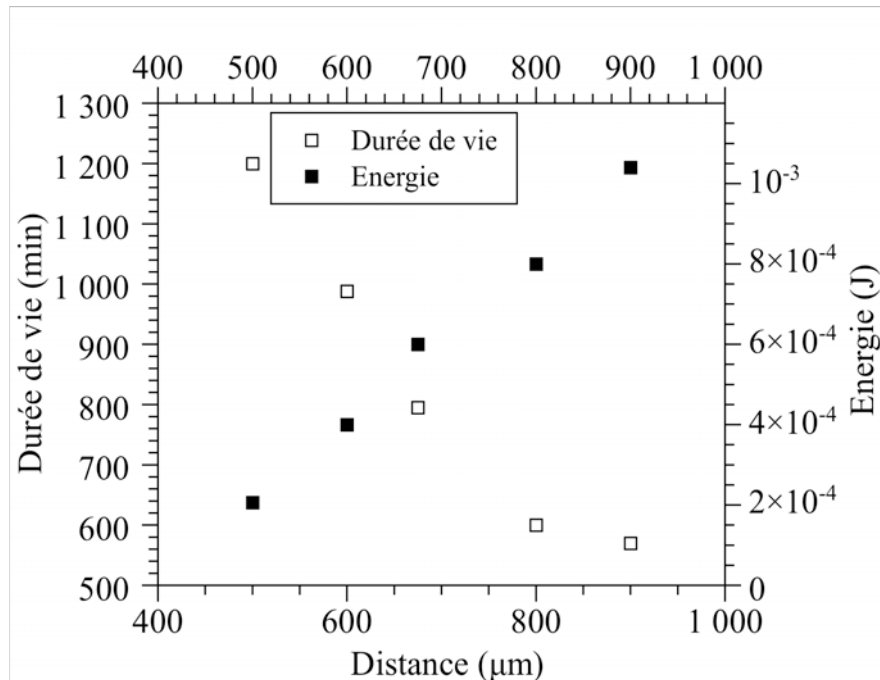


Figure V.24 Variation de la durée de vie et de l'énergie moyenne en fonction de la distance.

Nous remarquons d'une part que la durée de vie diminue en augmentant la distance, et d'autre part qu'elle est inversement proportionnelle à l'énergie.

B- Durée de vie du matériau en fonction de la tension

La Figure V.25 présente la variation du temps du vie du matériau en fonction de la tension sous CNTP. Une augmentation de la tension induit une augmentation de l'énergie moyenne dissipée, réduisant ainsi la durée de vie du PI.

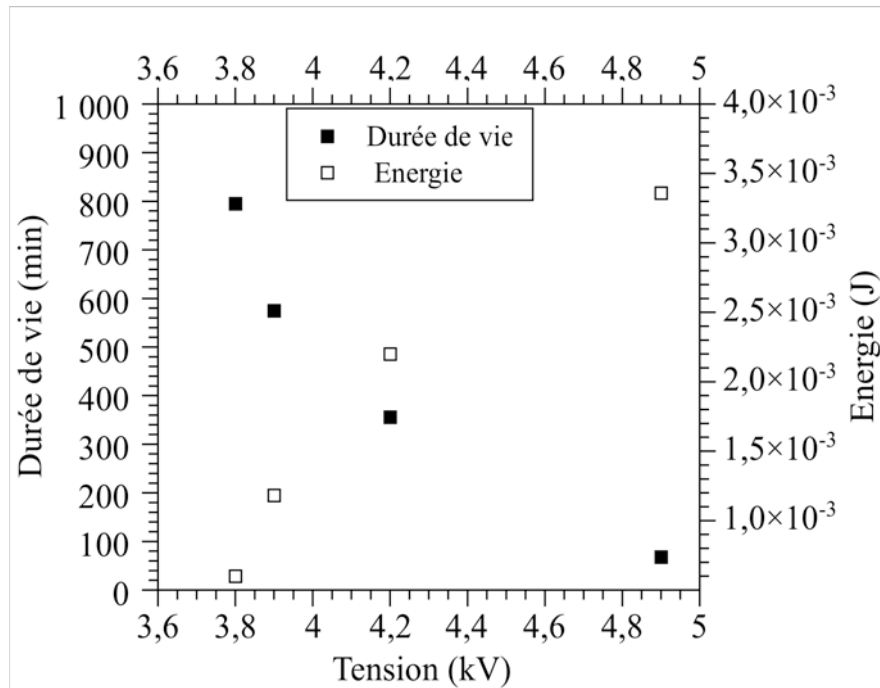


Figure V.25 Variation de la durée de vie et de l'énergie moyenne en fonction de la tension appliquée, T=25°C.

Le même comportement est observé pour un vieillissement sous 50 et 70°C.

C- Synthèse

En variant soit la tension, soit la distance, il a été démontré que la durée de vie est inversement proportionnelle à l'énergie moyenne dissipée. De plus, il a été démontré que l'évolution de l'énergie est caractérisée par une diminution temporaire de l'activité de la décharge liée à la formation d'une couche conductrice sur la surface vieillie qui augmente la durée de vie. Comme cette couche est présente quelles que soient la distance ou la tension appliquée, son influence sur la durée de vie peut être négligée. Par conséquent, en augmentant la distance ou la tension, les décharges deviennent plus énergétiques induisant une diminution de la durée de vie.

Par exemple, en examinant la surface de trois échantillons exposés aux décharges pendant la même durée (90min) et pour trois distances différentes, nous remarquons qu'elle est de plus en plus dégradée en augmentant la distance, vu que les décharges deviennent plus énergétiques.

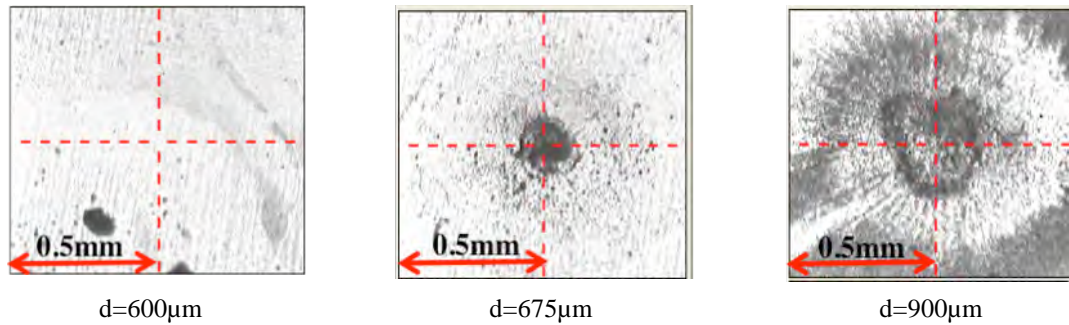


Figure V.26 L'état des surfaces du PI exposées sous décharges pour différentes distances

V.2.1.4 Synthèse des résultats

L'examen des résultats présentés ci dessus montre qu'il n'est pas si évident de relier la durée de vie à l'énergie dissipée. Il faut donc essayer de chercher une autre caractéristique de la décharge qui influe davantage sur la durée de vie et qui tient compte de la variation des différents paramètres. Le tableau suivant présente une synthèse des résultats obtenus sur l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la décharge et sur la durée de vie du PI.

<i>En augmentant la</i>	Nombre de décharges	Intensité des décharges	TADP	Energie dissipée	Durée de vie
Pression	Variable	<i>Diminue</i>	Augmente	Augmente	<i>Augmente</i>
Température	Diminue	<i>Augmente</i>	Diminue	Augmente	<i>Diminue</i>
Distance	Augmente	<i>Augmente</i>	Augmente	Augmente	<i>Diminue</i>
Humidité relative	Augmente	<i>Diminue</i>	Augmente	Augmente	<i>Augmente</i>
Tension	Augmente	<i>Augmente</i>	Augmente	<i>Diminue</i>
Pression sous une température élevée	Variable	<i>Augmente</i>	Augmente	Augmente	<i>Diminue</i>

Tableau V.4 Variation des caractéristiques des décharges en fonction des différents paramètres

En comparant les différentes caractéristiques avec la durée de vie, on note une relation intéressante entre la durée de vie et l'intensité des décharges. Quels que soient le comportement de l'intensité et de la durée de vie en fonction des différents paramètres, ces deux grandeurs sont toujours inversement proportionnelles. Une augmentation de l'intensité des décharges est équivalente à une diminution de la durée de vie. L'intensité des décharges peut être donc considérée comme étant un paramètre plus pertinent que l'énergie dissipée, pour la déduction du comportement de la durée de vie d'un isolant vieilli sous décharges. Par exemple sous basse pression, l'intensité des décharges devient plus élevée induisant une faible durée de vie bien que les décharges soient moins énergétiques.

V.2.2 Prédiction de la durée de vie

Après avoir étudié l'effet des différents paramètres sur la durée de vie du PI, il nous a paru utile d'étudier la validité des lois de prédictions de la durée de vie, présentes dans la littérature, sur nos résultats expérimentaux. Si leur validité est vérifiée dans nos conditions, une estimation de la durée de vie sous des conditions plus réelles sera possible.

V.2.2.1 Variation de la durée de vie en fonction de la température : Loi d'Arrhenius

A- Pour un même niveau de tension

Il a été démontré que la durée de vie diminue avec l'augmentation de la température, même si la contrainte électrique imposée diminue (en maintenant la tension à $1,5 \times \text{TADP}$). Cette diminution est reliée à la variation de l'activité de la décharge en fonction de la température où les décharges deviennent plus énergétiques. En plus, la dégradation du matériau est activée thermiquement par la température. En effet, l'énergie totale nécessaire pour la scission des chaînes peut être réduite par l'énergie thermique apportée au matériau. Cette activation thermique de dégradation se traduit par une diminution de la durée de vie qui suit une loi d'Arrhenius, comme le montre la Figure V.27. L'énergie d'activation correspond à la pente de la courbe de $\ln(L)$ en fonction de $1/k_B T$. Elle est égale à 0,309eV.

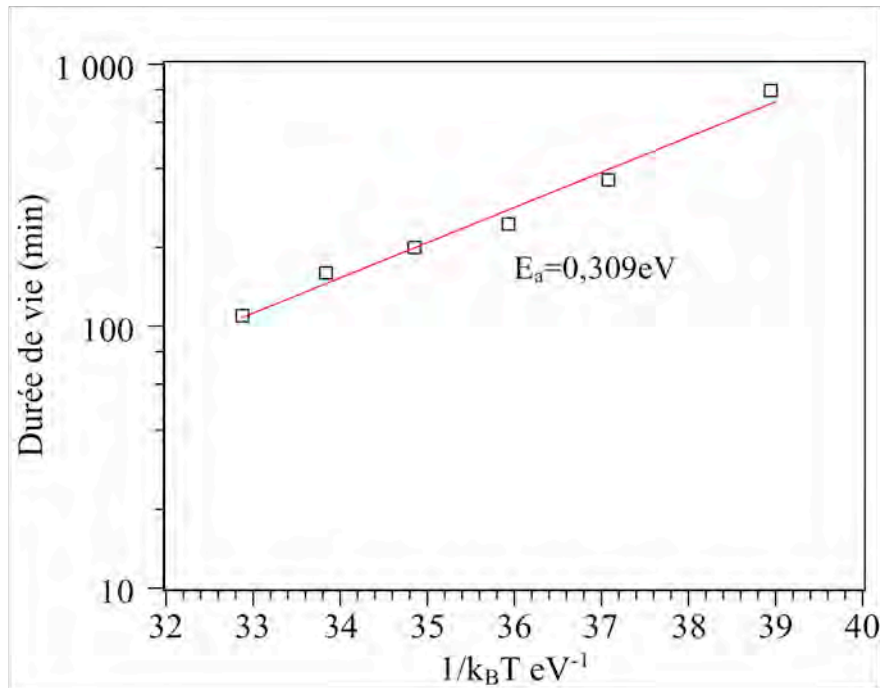


Figure V.27 Variation de la durée de vie en fonction de $1/k_B T$.

B- Pour plusieurs niveaux de tension

4 niveaux de tension sont à présent considérés pour une variation de température dans la gamme 25°C-70°C, soit 1,2-1,3-1,4-1,5-2 ×TADP.

Sur la Figure V.28 est représentée la variation de la durée de vie pour plusieurs niveaux de tension en fonction de la température dans un diagramme d'Arrhenius.

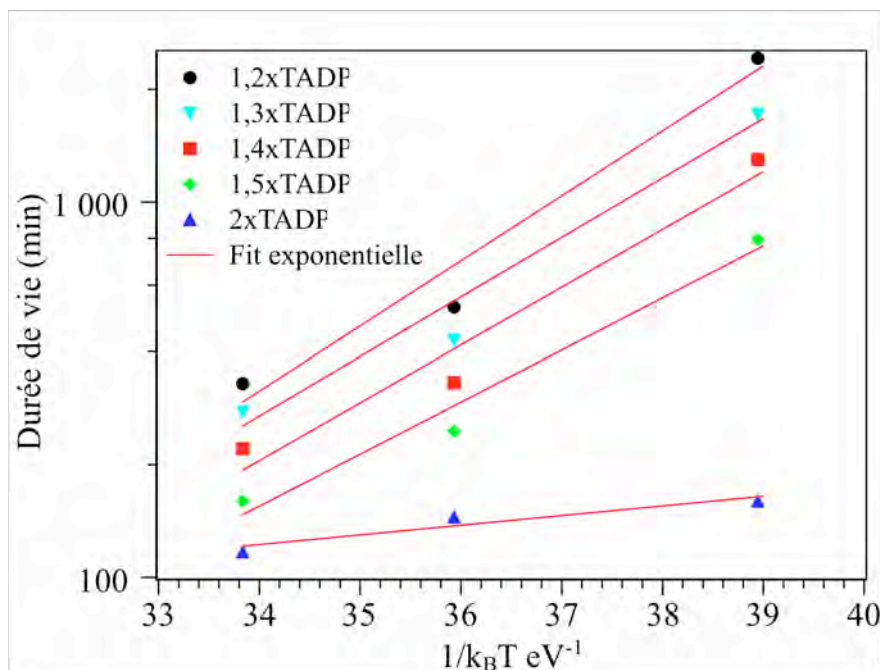


Figure V.28 Représentation de la variation de la durée de vie en fonction de la température dans un Graphe d'Arrhenius

Quel que soit le niveau de tension appliqué, la durée de vie est inversement proportionnelle à la température.

Nous pouvons également dans ce cas déterminer une énergie d'activation pour chaque niveau de tension. Cette énergie diminue en augmentant le niveau de tension comme illustré sur la Figure V.29.

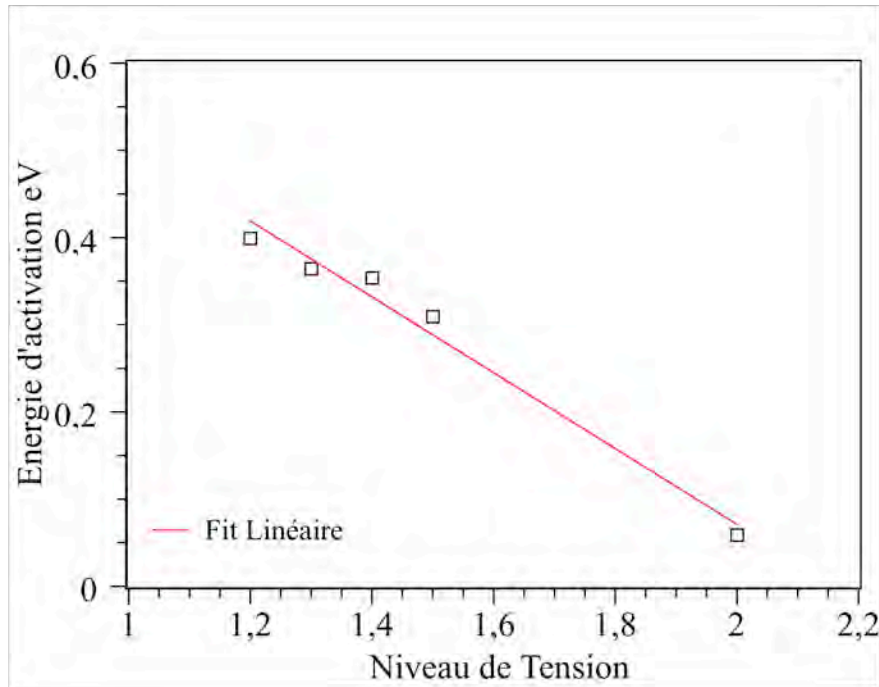


Figure V.29 Variation de l'énergie d'activation en fonction du niveau de tension

L'effet de la température sur la variation de la durée de vie du PI pour un niveau de tension $1,2 \times \text{TADP}$ est beaucoup plus élevé que celui observé pour un niveau de tension de $2 \times \text{TADP}$. Ce comportement s'explique par la diminution de l'énergie d'activation qui implique que l'énergie dissipée en augmentant la tension domine de plus en plus celle apportée par la température jusqu'à atteindre un niveau de $2 \times \text{TADP}$ où l'effet de la température devient négligeable.

V.2.2.1.1 Variation de la durée de vie en fonction de la tension: Loi de puissance

D'après la Figure V.25 on note que la variation de la durée de vie en fonction de la tension suit la Loi de puissance inverse (voir paragraphe V.I.5.2) qui est de la forme :

$$L = k' V^{-n} \quad \text{V.16}$$

où L (ou temps de vieillissement) est la durée de vie du matériau, V la tension appliquée, et n , k' sont des constantes à déduire à partir des données expérimentales.

La validité de ce modèle dans le cas de nos résultats expérimentaux a été vérifiée par

l'obtention d'une droite, en traçant $\log(L)$ en fonction de $\log(V)$ (voir Figure V.30).

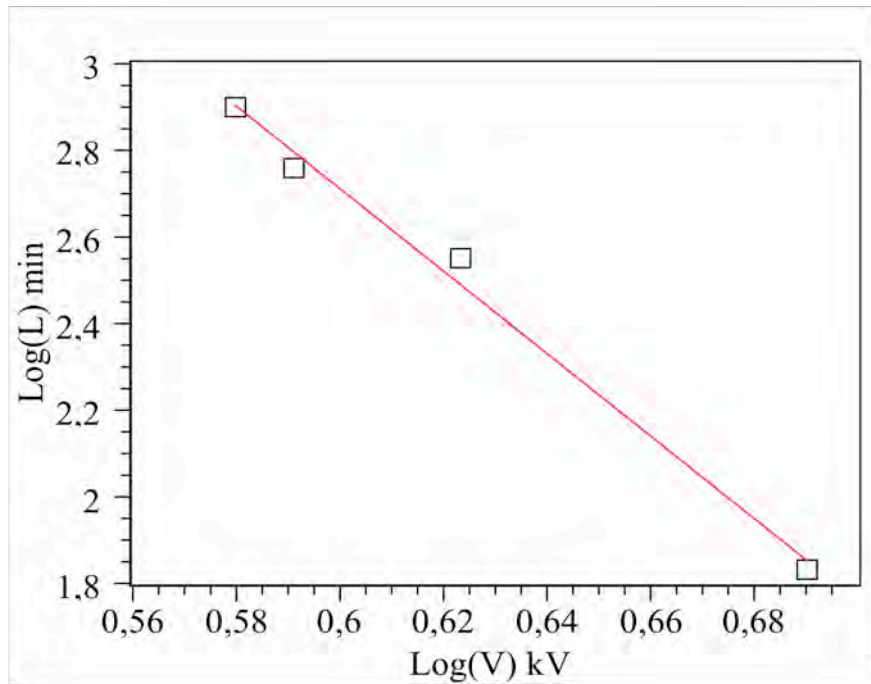


Figure V.30 Représentation de la loi de puissance, T=25°C

Les valeurs de n et k' déduites de la Figure V.30 sont :

$$n=9,522$$

$$k'=3.10^8$$

V.2.2.1.2 Variation de la durée de vie en fonction d'une combinaison température-pression : Loi de Ramu

Il a été démontré que la variation de la durée de vie en fonction de la tension sous 25°C suit la Loi de Puissance. Par contre, en appliquant une contrainte thermique combinée à la contrainte électrique, cette variation suit la Loi de Ramu détaillée dans le paragraphe I.5.4 :

$$L = K(T) \exp(-BDT) V^{-n(T)} \quad \text{V.17}$$

où L est la durée de vie, V la tension appliquée, B est une constante thermique déduite de la loi d'Arrhenius ; K et n sont deux constantes qui dépendent de K_1, K_2, n_1, n_2 et de la température. Ces constantes peuvent être déterminées expérimentalement.

La validité de ce modèle dans le cas de nos résultats expérimentaux (pour T=50 et 70°C) a été vérifiée par l'obtention d'une droite, en traçant $\log(L)$ en fonction de $\log(V)$ (voir Figure V.31).

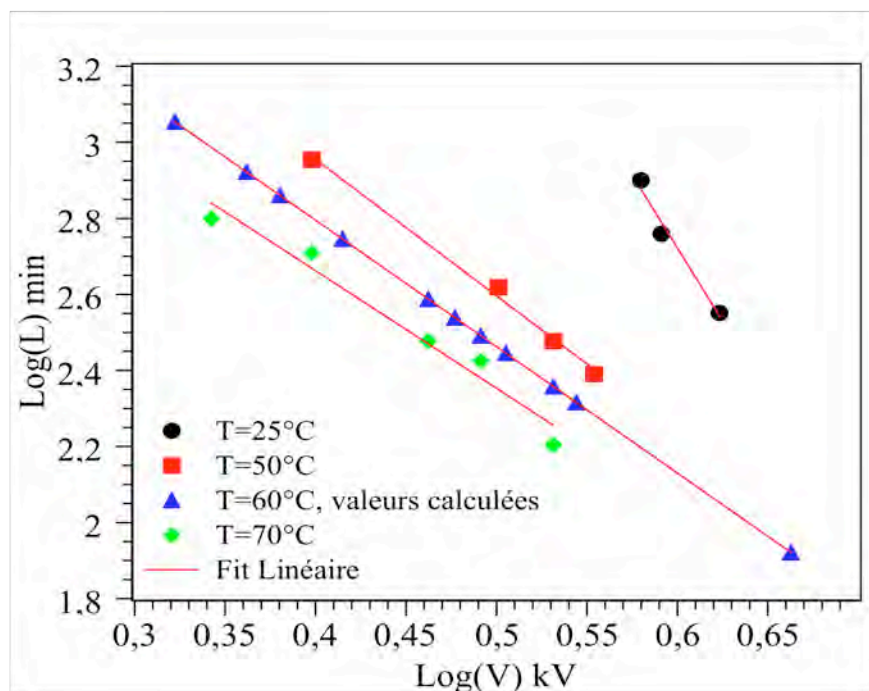


Figure V.31 Représentation de la loi de Ramu pour différentes valeurs de température et de tension

Le Tableau V.5 présente les paramètres calculés en fonction de ce modèle, en se basant sur nos résultats expérimentaux :

Modèle de Ramu	n_1	n_2	K_1	K_2+B
Valeurs déduites de l'expérience	4,235	2600	11,58	5947,37

Tableau V.5 Valeurs des constantes du modèle de Ramu déduites de nos points expérimentaux

Connaissant ces valeurs, les valeurs de $n(T)$ et $K(T)$ peuvent être extraites pour n'importe quelle température. Par conséquent, pour une température donnée, on peut en déduire la durée de vie correspondante à une valeur de tension appliquée.

Prenons par exemple $T=60^\circ\text{C}$:

$$n(T) = n_1 - n_2 DT = 3,325 \text{ et } K(T) \exp(-BDT) = 13340 \quad \text{V.18}$$

Alors l'expression (V.17) devient :

$$L = 13340 \times V^{-3,325} \quad \text{V.19}$$

Les valeurs de la durée de vie déduites de (V.19), correspondant à plusieurs valeurs de tension appliquée, sont illustrées sur la Figure V.31.

Afin de vérifier notre démarche, prenons la durée de vie calculée pour une tension de 3,5kV à 60°C. La valeur calculée est de 207 min qui est presque égale à celle obtenue expérimentalement, qui était de l'ordre de 200 min.

V.2.3 Conclusion

L'exploitation de l'évolution de l'énergie tout le long du temps de vieillissement a démontré une dépendance entre cette variation et la densité des molécules d'eau présente dans l'air. En effet, en fonction du taux d'humidité, une couche conductrice se forme sur la surface du matériau vieilli sous décharge. Sa présence induit une diminution temporaire de l'énergie dissipée sur la durée du vieillissement et influe sur la durée de vie du PI.

Une amélioration de la durée de vie a été observée en augmentant la pression ou l'humidité relative, sous 25°C, bien que les décharges soient plus énergétiques. Cette amélioration est reliée à la présence de cette couche qui fournit une protection de courte durée de la surface vieillie, renforçant la tenue du matériau et prolongeant la durée de vie.

Or en augmentant la température et quelle que soit la valeur de la pression appliquée, les décharges deviennent plus énergétiques et la durée de vie du matériau diminue.

D'après ces résultats, il paraît difficile d'établir une relation directe entre l'énergie et la durée de vie, qui soit valable quelles que soient les conditions appliquées. En nous basant sur l'étude menée dans le chapitre IV, nous avons pu trouver une relation plus efficace entre la durée de vie et une autre caractéristique de la décharge qui est l'intensité. Il a été démontré que quelles que soient les conditions appliquées, la durée de vie et l'intensité des décharges sont inversement proportionnelles.

Enfin, la loi de Ramu, la loi de puissance et la loi d'Arrhenius sont des lois qui existent dans la littérature pour la prédiction de la durée de vie suivant la nature de la contrainte appliquée. Leur validité dans le cas de nos résultats expérimentaux a été vérifiée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale...

L'objectif principal de ce travail était d'étudier, d'une part l'impact de la variation des paramètres environnementaux sur les caractéristiques des décharges électriques dans un environnement de type « avionique » afin d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes physiques responsables du développement de la décharge, et d'autre part l'influence de l'environnement aéronautique sur le vieillissement des isolants des systèmes électriques.

Conformément à notre objectif, notre travail peut donc se résumer en deux grandes parties, la première plus liée aux décharges et à leur phénoménologie en milieu aéronautique, la deuxième plus proche des matériaux isolants et leur vieillissement sous décharges.

Pour chacune de ces parties, nous allons résumer notre contribution et présenter les perspectives de recherches associées.

Un banc d'essais déjà développé au laboratoire, nous a permis de recréer les contraintes liées à l'environnement de fonctionnement des systèmes électriques embarqués. Ce dispositif, caractérisé par la variation des paramètres atmosphériques, nous a permis d'étudier l'impact d'une baisse de pression, de la variation de la température et du taux d'humidité relative sur les caractéristiques des décharges électriques dans l'air entre différentes configurations d'électrodes. Les résultats obtenus lors de cette étude nous ont permis de déterminer le domaine de validité des corrections établies issues de la littérature. Ainsi, nous avons mis en évidence que :

- La validité des facteurs correctifs établis dans la littérature dépend des conditions appliquées : la correction de Peek est validée pour des températures inférieures à 25°C en faisant varier soit la pression, soit la distance. La correction de Dunbar est validée pour des températures supérieures à 25°C, en faisant varier la distance à la pression atmosphérique. Tandis que pour des combinaisons de températures élevées et de pressions cette correction n'est plus applicable. Basée sur les résultats expérimentaux, une nouvelle formule empirique pour le calcul de la tension de claquage sous conditions combinées, a été proposée et validée pour des températures supérieures à 35°C.
- La variation de la température à gauche du minimum de Paschen entraîne l'apparition de deux mécanismes de claquage : pour des faibles températures, le mécanisme de claquage mis en jeu est *gaz mechanism*, alors que pour des températures élevées le mécanisme responsable du développement de la décharge est *vacuum mechanism*.

Conclusion générale

- Les phénomènes physiques régissant le développement de la décharge entre deux électrodes métalliques, sont les mêmes que ceux présents lors du développement de la décharge entre une électrode métallique et une électrode couverte par un isolant.
- La variation des paramètres atmosphériques influent sur les caractéristiques des décharges (nombre, intensité). Cette variation a été expliquée en se référant au *lpm* des électrons.

D'un point de vue macroscopique, le principal paramètre physique responsable du changement du mécanisme de claquage en fonction de la température est le libre parcours moyen des électrons. Il a été démontré que pour une pression donnée ($p < p_{\min}$), si la valeur du *lpm* est supérieure à la distance interélectrodes « *d* », le mécanisme responsable du développement de la décharge dans l'espace interélectrodes est ***vacuum mechanism***, alors que pour un *lpm* inférieur à « *d* », le mécanisme mis en jeu est le ***gaz mechanism***.

A partir de ces résultats, qui représentent l'effet des variations combinées de la température et de la pression sur la tension de claquage, des recommandations sur l'initiation des décharges dans l'environnement aéronautique peuvent désormais être identifiées. Par exemple, connaissant l'état de fonctionnement de l'équipement, le type de mécanisme de claquage qui pourrait se produire peut être estimé, et par conséquent la valeur de la TADP peut être déduite.

Dans notre étude nous avons mesuré l'énergie dissipée par les décharges, or le volume occupé par la décharge dans l'espace interélectrodes varie suivant le régime de décharge mis en jeu, donc il sera intéressant de mesurer la densité d'énergie dissipée.

Dans le cadre de la caractérisation de l'impact de l'environnement avionique sur le vieillissement des isolants des SIE, deux points ont été abordés :

Premièrement, nous avons étudié son influence sur l'énergie dissipée par les décharges et mesurée sur toute la durée du vieillissement. Il a été démontré qu'il existe une dépendance entre la variation de ce comportement et la densité des molécules d'eau présente dans l'air. En effet, en fonction du taux d'humidité, une couche conductrice se forme sur la surface du matériau vieilli sous décharge. Sa présence induit une diminution temporaire de l'énergie dissipée tout le long du temps de vieillissement.

Ensuite une étude sur son influence sur la durée de vie du PI vieilli sous décharge était menée afin d'avoir une conclusion plus pertinente sur la relation entre l'énergie dissipée par les décharges et la durée de vie :

- En travaillant à la pression atmosphérique et en faisant varier soit la distance, soit la température, soit la tension, la durée de vie du matériau est inversement

Conclusion générale

proportionnelle à l'énergie. Plus les décharges sont énergétiques, plus la durée de vie du matériau est faible.

- Tandis qu'en faisant varier la pression et l'humidité, sous température ambiante, l'énergie et la durée de vie sont proportionnelles. Dans ce cas là, c'est le changement que subit la surface du PI exposée sous décharge qui influe sur la durée de vie du polymère. Ce comportement a été attribué à la formation d'une couche conductrice sur la surface du matériau vieilli sous décharges, sous CNTP. Sa présence induit une protection de courte durée de la surface, renforçant ainsi la durée de vie du PI, même si les décharges sont plus énergétiques.

De cette étude, il ressort donc qu'il n'est pas évident de relier la durée de vie à l'énergie dissipée par les décharges. Une autre caractéristique semble être plus probante pour la déduction de la durée de vie d'un isolant vieilli sous décharges : il s'agit de l'intensité des décharges. Par exemple sous basse pression, l'intensité des décharges devient plus élevée induisant une faible durée de vie bien que les décharges soient moins énergétiques. Des études additionnelles doivent être réalisées afin de mieux comprendre la relation reliant l'intensité et la durée de vie du PI vieilli sous décharges.

Suite à cette étude, il découle plusieurs perspectives de recherche concernant l'apparition des décharges et leurs effets sur les SIE :

- Poursuite de l'étude de vieillissement du PI en utilisant des épaisseurs plus proches de l'application industrielle, et étude sur l'impact du vieillissement sous décharges sur les propriétés électriques du matériau isolant.
- Poursuite d'une étude plus approfondie sur la relation reliant l'intensité des décharges et la durée de vie du PI.
- Vérification de la validité des lois de prédiction de la durée de vie sous des conditions plus proches des applications industrielles.

Le besoin d'une meilleure compréhension des causes et des conséquences de l'apparition des décharges dans les SIE reste toujours une priorité pour l'industrie aéronautique, vue leur apparition dans la grande majorité des systèmes électriques embarqués, et qui constitue actuellement, l'un des points durs du développement des avions plus électriques.

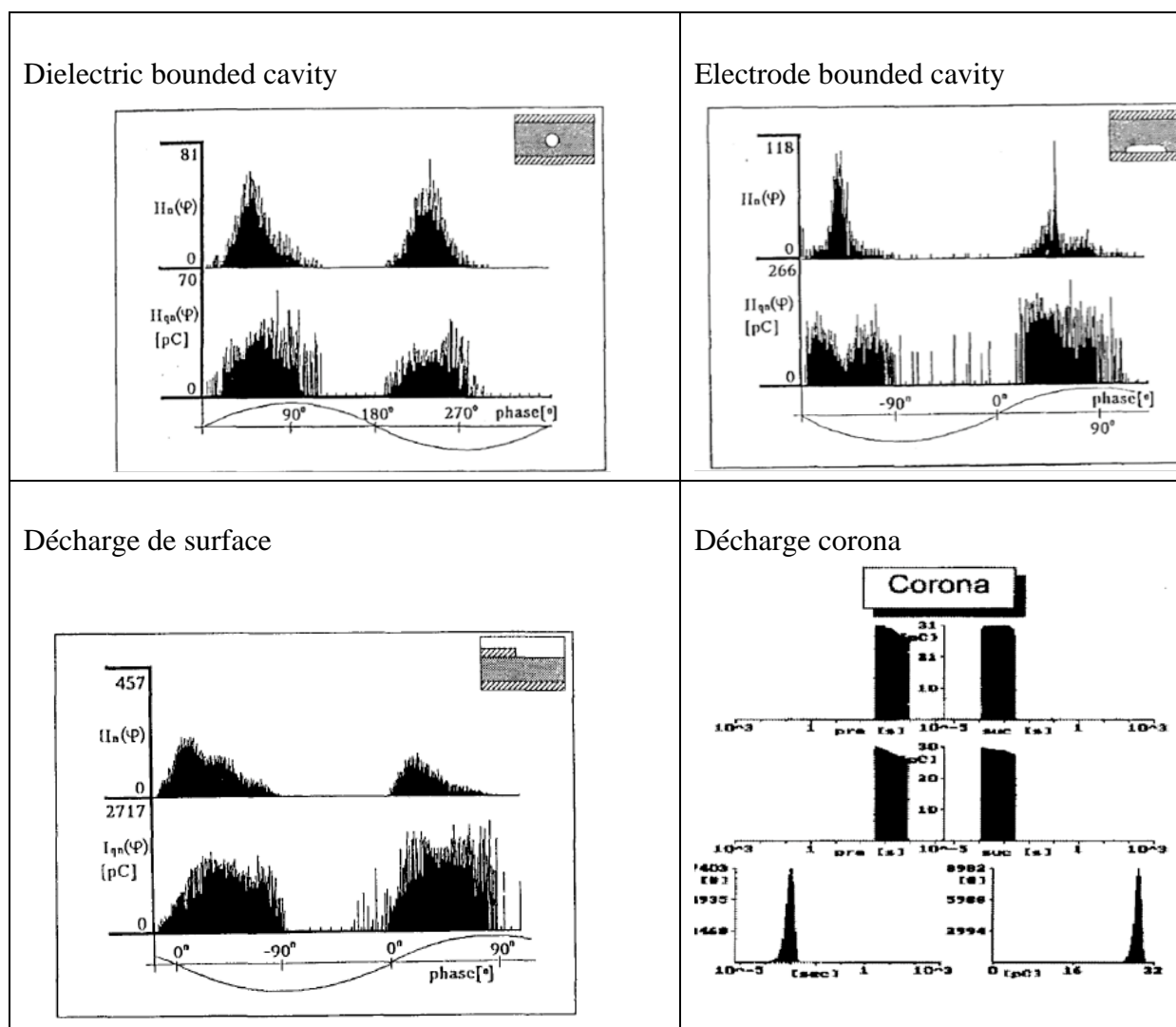
ANNEXES

Annexes...

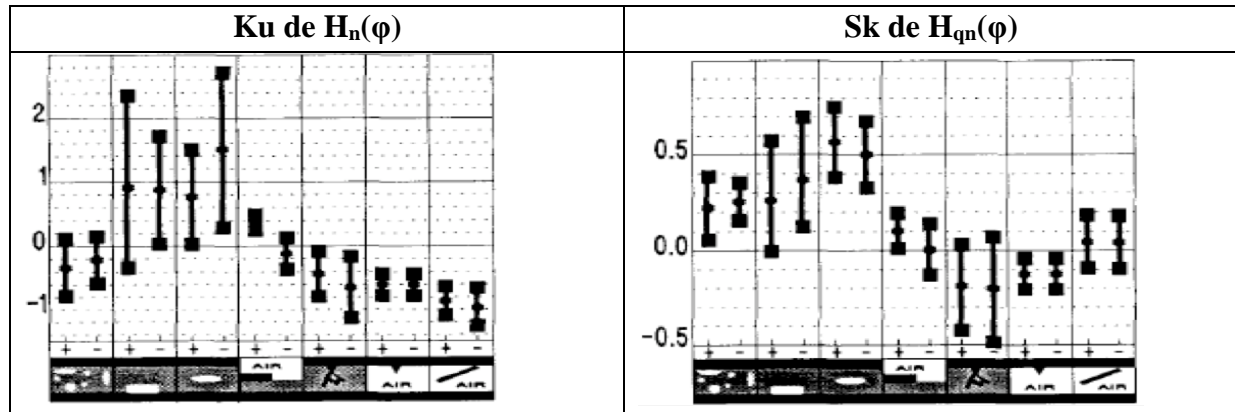
ANNEXE 1

Identification des sources de DP

Spectres de représentations des décharges partielles [GUL92] :



L'analyse de ces diagrammes a été faite à l'aide des opérateurs statistiques Sk et Ku. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :



ANNEXE 2

Caractéristique de l'enceinte climatique VOTSCH type 7018 pour la simulation de l'environnement Climatique

Selon la norme CEI 60068-3-5

A. Caractéristiques techniques essais en température :

Plage de température : -70 °C à +180°C

Stabilité (temporelle) : +/-0.1 à +/-0.5K

Homogénéité : 1K à 4K

Vitesse de variation :

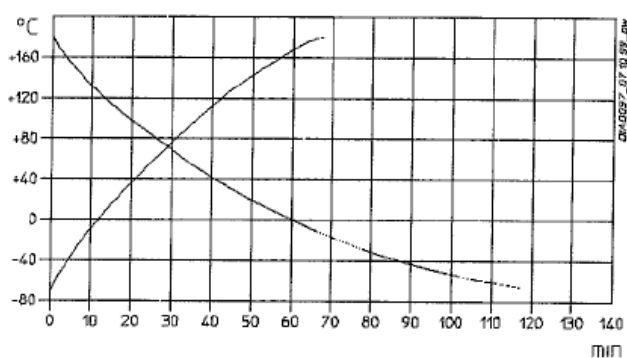
Chauffage : 4.0K/min

Refroidissement : 2.3K/min

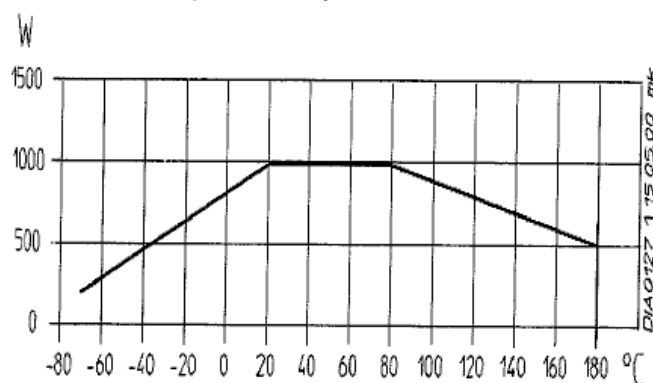
Compensation thermique max. environ : 1000W

Valeurs d'étalonnage : +23°C et +80°C

Courbe de variation en température



Courbe de compensation thermique



B. Caractéristiques techniques essais climatiques :

Plage de température : +10°C à +95°C

Stabilité (temporelle) : +/-0.1 à +/-0.3K

Homogénéité 1K à 2K

Plage d'humidité : 10%hr à 98%hr (voir climatogramme : figure IV.5)

Température de rosée : -3°C à 94°C

Homogénéité : +/-1.0 %hr à +/-3%hr

Compensation thermique :

400W sur la plage de 25°C à +95°C avec humidité relative jusqu'à 90%hr.

Valeurs d'étalonnage :

+23°C / 50%hr et +95°C / 50%hr

Consommation en eau du dispositif d'humidification :

A +40°C/ 92%hr. < 2l/24h

Mesure d'humidité : Sonde psychrométrique avec alimentation permanente en eau, autonettoyante

ANNEXE 3

A. ICM System

Le ICM System est un détecteur de DP's numérique utilisable sur une large palette d'applications. Cet instrument transmet les impulsions électriques associées aux décharges en respectant leurs amplitudes et angle de phase dans une représentation trois dimensions [ICM].

Unité d'acquisition :

L'unité centrale d'acquisition du système de détection est la même pour toutes les applications.

L'adaptation aux demandes spécifiques de chaque application est possible en choisissant les éléments de circuits (amplificateur, dispositif de couplage) correspondants. L'unité d'acquisition est constituée de six modules.



1- Le module d'alimentation AC2

Le LED vert indique que l'instrument est mis sous tension. La tension d'entrée doit être dans la gamme 95 – 260 VAC et une fréquence 47 – 63Hz

2- Le module de contrôle CTRL3

Ce module contient la communication GPIB et le port série. UN affichage par des LEDs indique à chaque instant l'état du système, par exemple : en communication, démarrage de l'acquisition, ou une activité de DP.

3- Le module DPR3

Le module DPR3 permet de générer les références logiques (temps et phase). Il contient les blocs mémoires et le circuit de mesure de la tension. Ainsi, le logiciel peut afficher la forme exacte de la tension appliquée sur l'objet à tester. Le DPR3 contient un dispositif pour le contrôle de la signature des décharges et l'émulation du port RAM afin d'avoir l'acquisition des spectres et communication en mode asynchrone.

4- Le module de conversion analogue/numérique ADC3

L'unité ADC3 réalise la conversion en numérique des impulsions électriques analogues. Ce module détermine l'amplitude des impulsions et leurs polarités. Il peut traiter différentes formes d'impulsions en fonction de l'équipement testé.

La conversion analogique numérique peut être réalisée en deux modes trigger :

- Trigger aux premiers pics : le premier pic du signal mesuré est mémorisé et converti sous la forme d'une expression numérique. Afin d'empêcher la lecture des multiples signaux oscillants, une autre impulsion qui apparaît sur la durée définie par le temps mort peut re-trigger le temps mort. C'est le mode re-triggerable.
- Trigger in time window : la décision concernant la polarité des impulsions est prise au fin de (time window). Ainsi, les deux pics positif et négatif sont mesuré et mémorisé dans le temps mort, défini. Le plus grand d'entre eux sera transféré au module DPR3.

Dans les deux modes présentés ci-dessus, la conversion est démarrée si l'amplitude des impulsions électriques dépasse le niveau du bruit établi par LDD.

Le temps mort (DT) définit l'intervalle de temps durant lequel une impulsion est convertie en numérique et ce temps est réservé pour une seule impulsion électrique. Le temps mort minimum est de 5 μ s.

Le LDD (Low Level Discrimination) permet de rejeter le niveau de bruit ou de décharges qui ont une faible intensité et un taux de répétition grande Il réagit de façon symétrique sur les impulsions positives et négatives.

La résolution du convertisseur est de 12bits. La fréquence d'échantillonnage maximale en temps réel est de 200kHz.

5- Le module AMP3

Ce module contient l'amplificateur du signal associé à la DP. Il ya un computer

programmable pour la gain et la bande passante des filtres. De plus, le module intègre un commutateur analogique numérique pour la mesure de la charge apparente en respectant la norme IEC270.

Les paramètres spécifiques sont :

- Gain 1, 2, 4, 8, 10, 20, ...200, 400, 800
- Impédance d'entrée 50_
- Fréquence de coupure : BF 40, 80, 100Hz et HF 250, 600, 800Hz

6- Le module GATE3

Le module de déclenchement GATE3 surveille le trigger du bruit afin d'éviter que ce signal ne contribue à la signature des DPs. La structure est la même que celle du AMP3. De plus, il contient un trigger contrôlé. Si un signal de bruit amplifié dépasse le niveau trigger, un signal interne TTL est transmis aux modules AMP3 et ADC3. Activé par le programme de contrôle, ce signal ouvre un commutateur analogue AMP3 et empêche le traitement d'une autre impulsion électrique.

B. Dispositifs externes utilisés pour la détection des DPs

Le RPA1 est un préamplificateur pour les mesures dans le domaine des basses fréquences en respectant les normes IEC 602270. La bande passante du filtre est légèrement plus large que celle des filtres intégrés dans les modules AMP3 et GATE3. Ainsi, les filtres de l'unité d'acquisition contrôlent seulement la bande passante globale. La sensibilité (en terme de PC) dépend des connections dans le circuit de mesure et du niveau de bruit. Les paramètres caractéristiques de cet amplificateur sont :

- Impédance d'entrée 10k_/200pF
- Bande passante 40kHz – 800kHz
- Sensibilité d'entrée < 200Mv

Le HST1 est un préamplificateur pour la tension mesurée. Le système ICM l'actionne à distance s'il est connecté à l'entrée SYNC IN du module DPR3. Les spécifications de cet amplificateur sont :

- Impédance d'entrée 10M_
- Gamme de tension 100Vrms
- Bande passante 30 - 400Hz

Le quadripôle CIL est constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance d'atténuation. L'inductance et la résistance sont calculées pour former, avec la capacité de

couplage, un filtre de second ordre passe-haut. La figure ci-dessous présente le schéma électrique de ce dispositif.

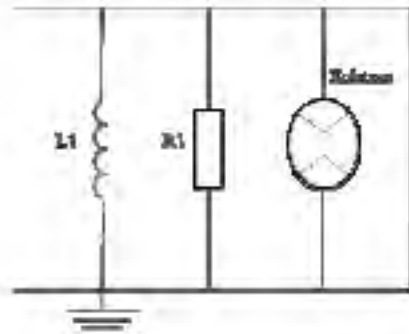


Schéma électrique du quadripôle CIL4L.

Les spécifications du quadripôle CIL4L qu'on utilise pour les mesures de DPs sont :

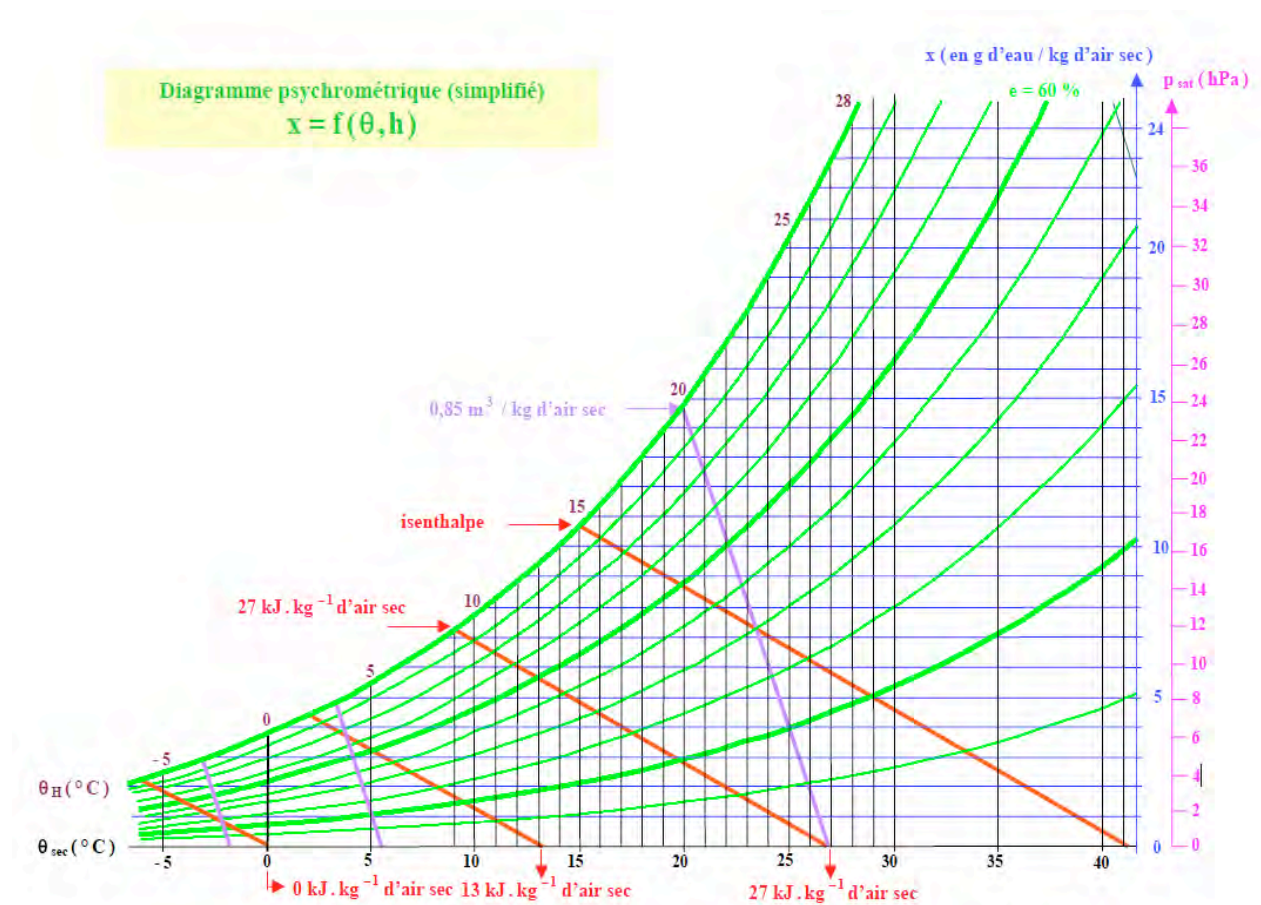
- 600pF – 2.5nF, 100mH
- Tension maximale 125kV (50Hz)

Le calibrateur CAL1 est utilisé pour réaliser la calibration du circuit de mesure des DPs. Le calibrateur est un générateur d'impulsions et il permet de régler l'amplitude et la polarité d'une seule impulsion de charge par cycle. Cet instrument est synchronisé avec la fréquence de la ligne de tension par l'intermédiaire d'une photodiode. L'impulsion de charge du calibrateur est engendrée par l'injection d'un échelon variable de tension à travers une capacité fixe. Le calibrateur doit être relié en parallèle avec à tester. La gamme de charge standard pour CAL1A est 1/2/5/10/20/50/100pC. Etant donné que le calibrage de l'appareil de détection est en fonction des paramètres diélectriques de l'objet, il est nécessaire de recalibrer à chaque changement d'objet.

ANNEXE 4

Diagramme psychrométrique

Le diagramme psychrométrique dit de "Mollier" permet pour une température donnée de passer de l'humidité relative à l'humidité absolue. Les deux axes principaux représentent en abscisse la température, en ordonnée l'humidité absolue en gramme par kilogramme d'air sec.



ANNEXE 5

Méthode de synthèse des polyimides

Bien que les premiers polyimides aromatique ont été synthétisés depuis 1908 [REN08], il a fallu attendre la fin des années cinquante pour voir apparaître les premiers polyimides à haute masse molaire. En effet, c'est en 1956 chez DuPont R&D que le Dr A.Endrey a réussi à obtenir des polyimides par la réaction d'un composé intermédiaire soluble, connu sous le nom d'acide polyamique (APA)[EDW65][endrey65, 66, sroog91]. Cette synthèse du polyimide s'effectue en deux étapes. La première consiste à préparer une solution d'acide polyamique à partir de deux monomères précurseurs, un dianhydride et une diamine à la température ambiante et dans des solvants aprotiques tels que la N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP). La solution d'acide polyamique ainsi obtenue, possède une masse molaire élevée et peut être déposée à la tournette sous forme d'un film mince sur différents substrats. La deuxième étape de cette méthode de synthèse est la cyclo-déshydratation obtenue en chauffant le film à des températures élevées, phase durant laquelle l'acide polyamique est converti en polyimide avec formation d'eau et évaporation des solvants, pour former le polyimide final insoluble et infusible. Les étapes de synthèse des polyimides par cette méthode sont représentées sur la Figure 1.

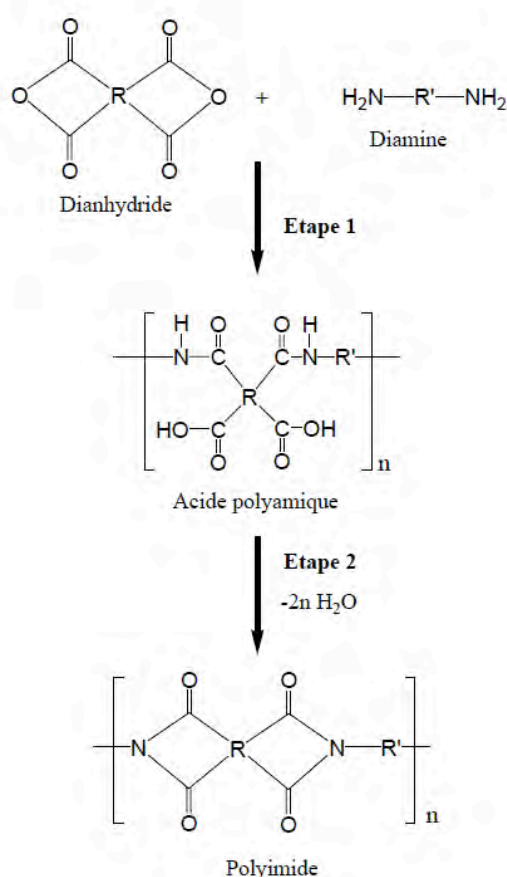


Figure 1 Synthèse des polyimides par la voie classique des deux étapes.

Annexes

De nombreuses variétés de PAA peuvent être synthétisées conduisant à des centaines de polyimides différents. Dans notre étude le polyimide choisi est le biphenyltetracarboxylic dianhydride acid *p*-phenylene diamine (BPDA/PDA).

Publications personnelles...

Revue internationale avec comité de lecture et actes

E. Sili, J.P. Cambronne and F. Koliatene, “*Temperature Dependence of electrical Breakdown Mechanism on the Left of the Paschen Minimum*”, IEEE Trans.Plas.Sci.vol.39, Issue 11, 2011.

E. Sili, J.P. Cambronne, “*A New Empirical Expression of the Breakdown Voltage for Combined Variations of Temperature and Pressure*”, International Journal of Engineering and Applied Sciences, Issue. 6, 2012.

E. Sili, J.P. Cambronne, N. Naudé, R. Khazaka, « *Polyimide Lifetime under Partial Discharge Aging: Effects of Temperature, Pressure and Humidity* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **accepté**.

Conférences internationales avec comité de lecture et actes

E. Sili, F. Koliatene and J.P. Cambronne, “*Pressure and Temperature effects on the Paschen curve*”, IEEE proceeding of the Conference On Electrical Insulation And Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, October 2011.

E. Sili, J.P. Cambronne, “*A New Empirical Expression of the Breakdown Voltage for Combined Variations of Temperature and Pressure*”, International Conference on Quantum, Atomic, Molecular and Plasma Physics, Madrid, Spain, March 2012.

Journées nationales sans comité de lecture

E.Sili, J.P.Cambronne, “*Pressure, temperature and energy effects on the Paschen curve and the lifetime of the insulation*”, SPEC, More Electric Aircraft Technologies Symposium, Lyon, France 2011.

E.Sili, J.P. Cambronne, “*Etude de l’impact de l’environnement aéronautique sur la courbe de Paschen et sur la durée de vie de Polyimide*”, Séminaire « LAPLACE et AERONAUTIQUE », Toulouse, France 2012.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Références bibliographiques...

[A]

- [ABD] Norme ABD0100 Airbus Industry; Equipment – Design – General Requirements for Suppliers.
- [AGU90] M. Aguet et M. Lanoz, « Haute tension », Vol. XXII, PPUR presses polytechniques, 1990.
- [ALF01] T. L. Alford, Y. L. Zou, K. S. Gadre, N.D. Theodore, W. Chen, « Characterization of Thin Photosensitive Polyimide Films for Future Metallization Schemes », *Journal of Vacuum Science and Technology B*, pp. 1253 - 1258, 2001.
- [ALL07] N.L. Allen, M. Abdel-Salam and I. Cotton, « Effects of temperature and pressure change on positive corona and sparkover under direct voltage in short air gaps », *IET Sci.Meas. Technol*, Vol. 1, n° 4, pp. 210 - 215, 2007.
- [ALL86] N.L. Allen, « Corona, breakdown and humidity in the rod-plane gap », *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A*, Vol. 133, Pt. A, No. 8, pp. 526 - 568, November 1986.
- [ARD06] M.E. Ardeleanu, « La monitorisation des décharges partielles en câbles électriques et accessoires : Méthodes et gestion », *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, No.30, 2006.
- [AUC93] D.W. Auckland, A. Taha and B.R. Varlow, « Correlation of mechanical properties with electrical treeing behaviour at elevated temperatures », 1993 *Annual Report., Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 636 - 641, 1993.
- [AUS41] A. E. W. Austen et S. Whitehead, « Discharge in Insulation under Alternating Current Stresses », *Journal IEE*, Vol. 88, Part. II, pp. 18 - 22, 1941.

[B]

- [BAR05] F. Barruel, « Analyse et Conception des systèmes électriques embarqués. Application aux réseaux de bord d'avions », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, Juillet 2005.

Références bibliographiques

- [BAR79] R. Bartnikas, « *Engineering Dielectric, Corona Measurement and Interpretation* », Vol.1, ASTM, 1979.
- [BAR93] R. Bartnikas et J.P. Novak, « On the Character of Different of Forms of PD measurement and Detection », *IEEE, Trans. Electr. Insul.*, Vol. 28, n° 6, pp. 956 - 968, 1993.
- [BER66] H. Bertein, « Etude du seuil de la décharge gazeuse en présence d'une paroi isolante », *Revue générale d'Electricité*, Tome 75, n° 2 pp.165-173, Février 1966.
- [BEY86] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl, « *Hochspannungstechnik.* » Springer-Verlag, 1986.
- [BIT04] J .A. Bittencourt, « *Fundamentals of plasma physics* », édition 3, 17 Juin, 2004.
- [BOE07] Boeing_Commercial_Airlines, « Boeing Aero Magazine QTR_04 07. » Issue. 28, 2007.
- [BOG82] S. A. Boggs et G. C.Stone, « Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and PD », *IEEE, Trans. Electr. Insul.* Vol. 17, n° 2, pp. 143 - 150, 1982.
- [BRE03] F. Breit, « *Contribution à l'intégration hybride de puissance : Etude de l'environnement diélectrique des semiconducteurs* », Thèse de l'université Paul Sabatier, 2003.
- [BRI83] D. Briggs, C. R. Kendall, A. R. Blythe and A. B. Wooton, « Electrical Discharge Treatment of Polypropylene film », *Polymer*, Vol. 24, pp. 47 - 52, 1983.
- [BRO04] M.A. Brown, J.V. Champion, S.J. Dodd and P. Mudge, « An Investigation of Partial Discharge Energy Dissipation and Electrical Tree Growth in an Epoxy Resin », *2004 hirernotionol Conference on Solid Dielectrics*, 2004.
- [BRO66] S.C. Brown, « *Introduction to Electrical Discharges in Gases* », John Wiley & Sons, New York, USA, 1966.
- [BUD 80] P. Budenstein, « On the mechanism of dielectric breakdown of solids », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-15(3) pp. 225 - 240, 1980.

[C]

- [CAL08] L. Caliap, « Étude de l'optimisation diélectrique des isolants pour les contraintes des Postes haute tension sous enveloppe métallique (PSEM) », *Jcge* ,2008.

Références bibliographiques

- [CHA 01] J.V. Champion et S.J. Dodd, « Simulation of partial discharges in conductiong and non-conduction electrical tree stuctures », *Journal of Physics D : Applied Physics*, Vol. 34 pp.1235 - 1242, 2001.
- [CHA00] J.V. Champion, S.J. Dodd, A.S. Vaughan, Y. Zhao and S.J. Sutton, « The effect of voltage, temperature and morphology on electrical treeing in polyethylene blends », *8th Int. Conf. Dielectric Materials, Measurements and Applications*, pp. 35 - 40, 2000.
- [COT07] I. Cotton, « High Voltage Systems for the more Electric Aircraft Insulation Design and Testing Tutorial », National Grid Senior Lecturer, University of Manchester UK, 2007.
- [CYG89] P. Cygan, B. Krishnakumar and J.R. Laghari, « Lifetimes of Polypropylene Films under Combined High Electric Fields and Thermal Stresses », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24 No. 4, pp. 619 - 625, 1989.

[D]

- [DAV 66] D. K. Davies, M. A. Biondi, « Vacuum electrical breakdown between plan parallel copper electrode » *Journal of Applied Physics*, vol.37, pp. 2969 - 2977, July 1966.
- [DAV06] Yu I. Davydov, « On the first Townsend coefficient at High Electric Field », *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 53, n° 5, pp. 2932 -2935, 2006.
- [DEJ93] H. Dejean, P.P.F. Dejean, N. Foulon-Belkacemi, M. Goldman, and A. Goldman, « New electrical method of identification of polymer ageing kinetics », *International conference on Partial discharges*, Canterbury, UK, pp. 19 - 20, 1993.
- [DEL63] J.L. Delcroix, « *Physique des Plasma* », Tome 1&2, Dunod, Paris, France, 1963.
- [DIA07b] S. Diaham, « *Etude du comportement sous haute température de matériaux polyimides en vue de la passivation de composants de puissance à semi-conducteurs grand gap* », Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, France, 2007.
- [DIA11a] S. Diaham, M.L. Locatelli, T. Lebey, D. Malec, « Thermal imidization optimization of polyimide thin films using Fourier transform infrared spectroscopy and electrical measurements », *Thin Solid Films*, Vol. 519, pp. 1851 - 1856, 2011.
- [DON08] B. Dong, « *Etude et caractérisation de plasmas destines au contrôle actif d'écoulements gazeux subsoniques* », Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 2008.

Références bibliographiques

- [DRU40] M. J. Druyvesteyn, F. M. Penning, « The Mechanism of Electrical Discharges in Gases of Low Pressure », *Rev. Mod. Phys.* Vol.12, pp. 87 - 174, 1940.
- [DUN72] W. G Dunbar, « *High voltage design criteria* », Boeing company document D180- 15179-1, USA, 1972.

[E]

- [ELE72] *Élimination des perturbations dans la détection des Décharges*, Electra n° 21, pp. 55 - 72, Mars 1972.
- [EMA00] E. Emadi and M. Ehsani, « Aircraft Power Systems Technology, State of the Art, and Future Trends », *IEEE AES Systems Magazine*, pp. 28 - 32, January 2000.
- [EMA03] A. Emadi, M. Ehsani, M. Miller, « *Vehicular Electric Power Systems* », Ed Marcel Dekker, 2003.
- [EUG68] J. Eugene, J. McMahon, « The chemistry of corona degradation of organic insulating materials in High voltage fields and under mechanical strain », *IEEE Trans. Electr. Insul*, vol. Ei-3, No. 1, pp. 3 - 10, 1968.

[F]

- [FAL97] Z. Falkenstein, J. J. Coogan, « Microdischarge behaviour in the silent discharge of nitrogen - oxygen and water - air mixtures », *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.30, pp. 17 - 825, 1997.
- [FAT78] S.A. Fathi, S.A. Abobakr, « Breakdown of solid insulating films by partial discharge using sinusoidal and pulse voltages », *IEEE Trans. Electr. Insul*, Vol EI-13, No 5, pp. 337 - 342, October 1978.
- [FEN03] M. Fenger and G.C. Stone, « How Humidity Affects Partial Discharge Activity in Stator Windings », *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, Proceedings*, pp. 47 - 50, 2003.
- [FLA09] Flavien Koliatene, « *Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique* », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [FLOR99] B. Florkowska and P. Zydron, « The correlation of PD-charge and energy patterns in the study of partial discharge mechanism in thermosetting insulation », *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on*, vol.5, pp. 268 - 271, 1999.

Références bibliographiques

- [FOT07] J. Fothergill, « Ageing space charge and nanodielectrics : Ten things we don't know about dielectrics », *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, pp. 1-10, 2007.
- [FOU 95] N. Foulon Belkacemi, M. Goldman, A. Goldman and J. Amouroux, « Transformation of nodules into crystals on polymers submitted to corona discharges with streamer », *IEE Proc. Sci., Measur. Techn.*, Vol. 142, pp. 477 - 481, 1995.
- [FRA08] P. François, « Vers l'avion électrique », *Safran Magazine*, pp.10-11, 2008.
- [FRE11] S. Freissinet, « *Inquiétude sur les nouveaux avions en composite* » 1001 Crash Copyright © | 2005-2011 | | <http://www.1001crash.com> | CNIL N°1141631
- [FRI05] A. Fridman, A. Chirokov, and A. Gutsol, « Non-thermal atmospheric pressure discharges », *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol.38, pp.R1-R24, 2005.
- [FTIR] Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry, Thermo Nicolet Corporation 2001.
- [FUQ09] T. Fuqiang, B. Wenbin, Y. Chun, H. Lijuan, W. Yi, W. Xuan, L. Qingquan, « Study on physical and chemical structure changes of PI caused by corona ageing », *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Harbin, China, July 19-23, 2009.

[G]

- [GAM 87] M. Gamez Garcia, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, « Synthesis reactions involving XLPE subjected to partial discharges », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 22, pp. 199 - 205, 1987.
- [GAM90] M. Gamez Garcia, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, « Modificaiton of XLPE exposed to partial discharges at elevated temperature », *IEEE Trans.Electr.Insul.*, Vol.25, pp.688 - 692, 1990.
- [GAO] GAO analysis of information from FAA,NASA,Boieng Company,*Jane's all the world's Aircraft, and Jane's Aircraft Upgrades*.
- [GIB00] V. I. Gibalov and G. J. Pietsch, «The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces », *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.33, pp. 2618 - 2636. Printed in the UK, 2000.
- [GJA97] A. C. Gjaerde, « The Combined Effect of Partial Discharges and Temperature on Void Surfaces », *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,. IEEE 1997 Annual Report., Conference on*, vol.2, pp. 550 - 553, 1997.
- [GOL78] M. Goldman, A. Goldman, « Corona discharges *Gaseous Electronics* ed M N Hirsh and H J Oskam (New York Academic) .

Références bibliographiques

- [GOR03] Gorur G. Raju, « Dielectrics in electric fields », CRC Press, 22 janvier 2003.
- [GUL89] E. Gulski et F.H. Kreuger, « Digital computer system for measurement of partial discharges in insulation structures », *Proceedings of the 3rd Conf. On Cond. And Break. In Sol. Dielect.* , pp. 582 - 586, Trondheim, 1989.
- [GUL90] E. Gulski, P.H. Morshuis et F.H. kreuger, « Automized Recognition of Partial Discharges in Cavities », *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.29, pp.7-13, 1990.
- [GUL91] E. Gulski, « Computer aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools », Delft University Press, 1991.
- [GUL92] E. Gulski and F. H. Kreuger, « Computer aided recognition of discharge sources », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 27, No. 1, pp. 82 - 92, February 1992.
- [GUL93] E. Gulski, « Computer-aided Measurement of Partial Discharges in HV Equipment », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28 No. 6, pp. 969 - 983, December 1993.
- [GUL93a] E. Gulski and A. Krivda, « Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges », *IEEE Transactions on Electrical Insulation* Vol. 28 No. 8, pp. 984 - 1001, December 1993.

[H]

- [HAO09] Y. Hao, J. Chen, L. Yang, X. Wang, « Lissajous Figures of glow and filamentary Dielectric barrier discharges under high frequency voltage at atmospheric pressure in helium », *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and applications of dielectrics Materials*, pp. 626 - 629, Septembre 2009.
- [HAR77] G. Hartmann, « *Spectroscopie de la décharge couronne : Etudes des mécanismes de collisions dans le dard* », Thèse de l'Université Paris XI, 1977.
- [HAU06] T.B. Hau, « *Evaluation of Deterioration of the Aircraft Electrical Wiring System Due to Undetected Arcing Events* », A Master's Project Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements for the Degree of Master of Mechanical Engineering, 2006.
- [HDM-PI-2600] HD MicrosystemsTM, PI-2600 LX series-low stress polyimide- Product Information and Process guidelines, Fiche technique.
- [HEN00] P. O. Henk, « *Electrical Engineering Materials* », 41h Edition, 2000, DTU Tryk, The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

Références bibliographiques

- [HIE98a] G. D. Hietpas and D. L. Allara, « The Molecular Structure of Poly (biphenyl dianhydride-p-phenylenedianmine) Polyimide Thin Films by Infrared Spectroscopy: Thickness Dependence of Structure in the Nano- to Micrometer Range », *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 36, pp. 1247 - 1260, 1998.
- [HIE98b] G.D. Hietpas, J.M. Sands, D.L. Allara, « Formation of Molecularly Reconstructed Surface Layer during Unidirectional Rubbing of Polyimide Films », *Macromolecules*, Vol. 31, No. 10, pp. 3374 - 3378, 1998.
- [HO94] P. S. Ho, T. W. Poon, J. Leu, « Molecular Structure and Thermal/Mechanical Properties of Polymer Thin Films », *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 55, No. 10, pp. 1115 - 1124, 1994.
- [HOL92] J.T. Holbøll and M. Henriksen, « Partial discharge patterns and surface deterioration in voids in filled and unfilled epoxy », *IEEE International Sympos. Electr. Insul.* Cat. No. 92CH3150 0, pp. 354 - 358, 1992.
- [HOZ92] N. Hozumi, T. Okamoto et T. Imajo, « Discrimination of Partial Discharge Patterns Using a Neutral Network », *IEEE Trans.Electr. Insul.*, Vol. 27, n° 1, pp. 550 - 556, 1992.
- [HUD90] C. Hudon, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, « Surface conductivity of epoxy specimens subjected to partial discharges », *IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul.* Cat. No. 90 CH2727 6, pp. 153 - 155, 1990.
- [HUD92] C. Hudon, R. Bartnikas, « Surface and gas phase reactions arising with epoxy exposed to partial discharges », *CEIDP*, 1992.
- [HUD93] C. Hudon, « Spark to glow discharge transition due to increase surface conductivity on epoxy resin specimen », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28 No. 1, pp.1 - 8, February 1993.
- [HUS80] E. Hussain and R. S. Nema, « Surface Discharge Studies With Uniform Field Electrodes at Low Pressur », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-15 n°2, pp.128 - 133, 1980.

[I]

- [ICH93] H. Ichikawa, F. Komori, M. Hikita, Y. Suzuoki, T. Mizutani, K. Uchida, « Partial discharge patterns and degradation diagnosis of insulating polymers », *8th ISH*, Yokohama, Japan, August 1993.
- [IEC16] IEC 216 Standard, “*Guide for Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating Materials*”, Fourth issue, 1990-1994.
- [IEC70] IEC Publication 60, 1970.

Références bibliographiques

- [IEC89] International Electrotechnics commission (IEC) 60060-1 « High Voltage Measurement techniques » 1989.
- [IEC98] IEC 60270, « Partial discharge measurements », 3rd edition, 1998.
- [IEEE87] IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data, ANSI/IEEE Std 930, 1987.

[J]

- [JEA05] « *Physique des plasmas* », préface de Bernard Bigot, Jean –Marcel Rax , Dunod paris 2005 .
- [JIE 04] D. Jie, « *Development of Techniques to Quantify Chemical and Mechanical Modifications of Polymer Surfaces: Application to Chemical Mechanical Polishing* », PHD Thesis, School of Chemical and Biomolecular Engineering Georgia Institute of Technology, Decembre 2004.
- [JOH] John M. Cox, « Reducing the Risk of Smoke and Fire in Transport Airplanes: Past History, Current Risk, and Recommended Mitigations », FRAeS, Safety Operating Systems.

[K]

- [KAD83] K. Kadotani, Y. Kako, K. Matsunobu et F. Aki, « New voltage-endurance curves for combined thermal and electrical aging of coil insulation », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-18(1), pp. 53 - 58, 1983.
- [KAN88] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki, and S. Okazaki, « Stable glow plasma at atmospheric pressure », *J. Phys. D : Appl. Phys.*, Vol.21, pp. 838 - 840 ,1988.
- [KHA] R. Khazaka, « *Etude du vieillissement de polymères isolants utilisés dans le packaging des modules de puissance haute température* », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2011.
- [KIM95] Y. Kim, M. Ree, T. Chang, C. Ha, L.T. Nunes, J.S. Lin, « *Rodlike/Flexible Polyimide Composite Films Prepared from Soluble Poly(amic diethyl Ester) Precursors: Miscibility, Structure and Properties* », *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 33, No. 14, pp. 2075 - 2082, 1995.
- [KIR06] H. Kirkici, « High voltage insulation space environment and design guideline », *IEEE Proceedings Power Modulation Symposium*, pp. 33 - 370, 13-18 May 2006.

Références bibliographiques

- [KOG03] U. Kogelshatz, « Dielectric-barrier Discharges : Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications », *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol.33, pp.1 - 46, 2003.
- [KOG04] U. Kogelshatz, « Atmospheric-pressure plasma technology », *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol.46, pp. B63-B75, 2004.
- [KOG97] U. Kogelschatz, B. Eliasson and W. Egli, « Dielectric-barrier discharges - principle and applications » *XXIII ICPIG (Toulouse, France, 1997)* invited papers, 1997.
- [KRE89] F.H Kreuger, « *Partial Discharge Detection in High-voltage Equipment* », Butterworths & Co. (Publishers) Ltd, pp. 6 - 7, 1989.
- [KRE90] F.H. Keuger, « Partial discharge detection in high voltage equipment », Butterworth- Heinemann, pp. 78 - 85, 1990.
- [KUF00] E. Kuffl, W.S. Zaengl et J. Kuffel, « *High voltage engineering Fundamentals* », Newnes, 31 Juillet 2000.

[L]

- [LAB02] A. Labergue, « *Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements* » Thèse de l'Université de Poitiers Faculté des sciences fondamentales et appliquées, 2002.
- [LAH09] N. Lahoud, « *Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique Application à la fiabilité des matériaux* », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [LAN05] O. Langlois, E. Foch, X. Roboam et H. Piquet, « De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique : état de l'art et prospective sur les réseaux de bord », *Je3A, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, vol.4, Hors serie1, 1, 2005.
- [LAU92] C. Laurent et C. Mayoux, « Part XI : Limitations to PD as a diagnostic for Deterioration and Remaining Life », *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.8, pp.14 - 17, 1992.
- [LAV55] R.V. Latham, « *High voltage vacuum insulation* », Academic Press, 1955.
- [LAZ05] B.R. Lazarenko, « Non-equilibrium air plasmas at atmospheric pressure », edited by K. H. Becker, U. Kogelshatz, K. H. Shoenbach and R. J. Barker, Institute of Physics, Bristol and Philadelphia, 2005.
- [LEB 06] T. Lebey, D. Malec, S. Dinculescu, V. Costan, « Partial Discharges

Références bibliographiques

- Phenomenon in High Voltage Power Modules », *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* , Vol.13, pp. 810 - 819, 2006.
- [LIU06] X. Liu, « *Partial discharge detection and analysis in low pressure environments* », PhD from The Ohio State University, 2006.
- [LOE71] L.B. Loeb, « *Fundamental processes of electrical discharges in gases* ». J-Wiley Interscience-1971.
- [LON04] R. G. Lonngwitz, « *Study of gas ionisation in a glow discharge and development of a micro gas ionizer for gas detection and analysis* »Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, France, 2004.
- [LOR02] M. Di Lorenzo del Casale and R. Schifani, « Direct interaction between partial discharge and temperature on epoxies: Phenomenological life models », *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 33 - 39, 2002.
- [LUC01] J.R. Lucas, « *Breakdown of gaseous Insulation* », High voltage Engineering, 2001.www.classictesla.com/download/breakdown_gi.fdis
- [LUN92] L.E. Lungaard, « Partial discharge-Part XIII, Acoustic partial discharge détection fundamental considerations », *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 8, N°. 4, pp. 25 - 31,1992.

[M]

- [MAC 10] « Mon (futur) avion électrique personnel », Langley Research Center, C.D. *Sciences-et-Avenir.com*, 22/01/10.
- [MAR09] J.M. Martinez-Tarifa, A. Cavallini, G.C. Montanari, L.A. Dissado, « Surface Degradation on XLPE under PD activity », *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 417 - 420, 2009.
- [MAR99] J.C. Maré, « *Modélisation et commande des actionneurs hydrauliques* », Note de cours INSA GM5 1-3, version 1998/1999.
- [MAY92] C. Mayoux, « Aging pf Polymeric Insulating Maerials in Power Cables », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol.4, pp.665 - 673, 1997.
- [MCM63] E.J. McMahon, J.R. Perkins, « Surface and volume phenomena in dielectric breakdown of polyéthylène », *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Vol.82, pp.1128-1136, 1963.
- [MEE77] J.M. Meek et J.D Craggs, « *Electrical Breakdown of gases* », A wiley Interscience publication, 1977.
- [MES83] G.A. Mesyats, « Explosive processes on the cathode in a vacuum discharge », *IEEE Transactions on electrical insulation*, Vol. EI-18, no.3, pp. 218 - 225,

Références bibliographiques

- June 1983.
- [MIK08] P. N. Mikropoulos, C. A. Stassinopoulos and B. C. Sarigiannidou, « Positive Streamer Propagation and Breakdown in air: the influence of Humidity », *IEEE Trans. on Dielectr. And Electr. Insul.* Vol.6, Issue 2, pp. 416 - 424, 2008.
- [MIL77] US Military Specification Sheet, Wire, Electric, Fluorocarbon/ polyimide Insulated, MIL-W-8 138 1/ 11 C5, October 1977.
- [MOR 95] P. Morshuis, « Assessment of dielectric degradation by ultrawide-band PD détection », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 2, pp. 744 - 760, 1995.
- [MOR90] P.H.F. Morshuis and F.H. Kreuger, « Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids », *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 23, pp. 1562 - 1568, 1990.

[N]

- [NAS71] E. Nasser, « *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics* », John Wiley & Sons, New York, USA, 1971.
- [NAT88] D.A. Nattress, « Partial Discharge Measurement and Interpretation », *IEEE, Electr. Insul. Mag.* Vol. 4, n° 3, pp. 10 - 23, 1988.
- [NEL04] W. Nelson, « *Accelerated Tesiting* », Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2004.
- [NEL07] A.J. Nelms, « Electrical Discharge in the More Electric Aircraft Power System », Electrical and Electronic Engineering, Thèse de doctorat de l'Université de Manchester, 2007.

[O]

- [OKA86] T. Okamoto et T. Tanaka, « Novel Partial Discharge Measueremnt Computer aided Measurement Systems », *IEEE Trans. Electr. Insul.* Vol. 21, n° 1, pp. 1015 - 1019, 1986.
- [ORT07] P. Ortega, R.T. Waters, A. Haddad and R. Hameed and A.J Davies, « Impulse Breakdown Voltages of Air gaps: a New Approach to Atmospheric Correcction Factors Applicable to Internetaional Standards », *IEEE Trans. on Dielect. and Electrical Insulation*, Vol. 14, n° 6, pp. 1498 - 1508, 2007.
- [OSM07] P. Osmokrovic, M. Vujisic, K. Stankovic, A. Vasic, B. Loncar, « Mechanism of electrical breakdown of gases for pressures from 10^{-9} to 1 bar and inter-electrode gaps from 0.1 to 0.5mm », *Plasma Sources Sci. Technol.* vol.16, pp. 643 - 655, August 2007.

Références bibliographiques

- [OSM93] P. Osmokrovic, « Mechanism of electrical breakdown of gases at very low pressure and interelectrode gap values », *IEEE Trans. Plasma Sci*, vol.21, pp. 645 - 653, December 1993.

[P]

- [PAP63] R. Papoular, « *Phénomènes Electriques dans les Gaz* », Dunod, Paris, 1963.
- [PAS89] F. Paschen, "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potential differenz" *Annalen der Physik*, Vol. 273, Issue 5, pp. 69 - 96, 1889.
- [PEE24] F.W. Peek, « *Phénomènes Diélectriques dans la Technique des Hautes Tensions* », Librairie Delagrave, Paris, 1924.
- [PEE29] F.W. Peek, « *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering* », McGraw Hill, 1929.
- [PHU97] B.T. Phung, « *Computer-based partial discharge detection and characterisation* », Thèse de doctorat, University of New South Wales, 1997.
- [POI98] A.M. Pointu, J. Perrin, J. Jolly, « *Plasmas froids de décharge : propriétés électriques* » *Technique d'ingénieurs D 2830*, 1998.
- [POP68] I. Popescu, E. Badareu, « *Gaz Ionisés, Décharges Electriques dans les Gaz* », Dunod. Paris, 1968.

[R]

- [RET03] N. Retière, « *Modéliser et concevoir les réseaux d'énergie électrique* » Habilitation à diriger des recherches, UJF, Novembre 2003.
- [ROW07] S.W. ROWE, « Electrical ageing of composites: An industrial perspective », *Proc. 2007 IEEE Int.Conf. Sol. Dielectr.*, Winchester UK, pp 401 - 406, 2007.
- [RUI10] R. Rui, I. Cotton, « Impact of Low Pressure Aerospace Environment on Machine Winding Insulation », *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on*, pp.1-5, San Diego CA, 2010.

[S]

- [SAF] <http://www.safran-group.com/site-safran/innovation/expertises/l-avion-plus-electrique/?182>

Références bibliographiques

- [SAL01] M. Abdel-Salem, « *High voltage engineering: theory and practice* », Second Edition, 2001.
- [SAU03] I. Sauers, M.O. Pace, D.R. James, A.R. Ellis, « Energy dissipation by partial discharge in cryogenic cables », *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on*, pp. 624 - 627, 19-22 Oct. 2003.
- [SCH 01] R. Schifani, R. Candela and P. Romano, « On PD mechanisms at High temperature in voids included in an epoxy resin », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 8, pp. 589 - 597, 2001.
- [SEB] http://www.Sebakmt.com/fr/acceuil/produits/cables-denergie-contrôle_de_decharge-partielle
- [SEL 95] A.G. Sellars, O. Farish, B.F. Hampton, « Using the UHF technique to investigate PD produced by defects in solid insulation », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 2, N°. 3, pp. 448 - 459, 1995.
- [SHI98] N. Shimizu and C. Laurent, « *Electrical Tree Initiation* », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 5, pp. 651 - 659, 1998.
- [SIG91] R.S. Sigmond and T. Sigmond, « On the Role of Water in the Aging of Polymers in Air-insulated Electrical Systems », *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26 No. 4, August 1991.
- [SOL05] Classe Affaire n° 31, Editions du 4ème trimestre 2005.
- [STR89] M. Strobel, C. Dunatov, J.M. Strobel, C.S. Lyons, S.J. Perron and M.C. Morgan, « Low-Molecular-Weight Materials on Corona Treated Polypropylene », *J. Adhesion Sci. Technol*, Vol. 3, pp. 321 - 335, 1989.
- [SUZ92] H. Suzuki et T. Endoh, « Pattern Recognition of Partial Discharge in XLPE Cables Using neutral network », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 27, n° 1, pp. 543 - 549, 1992.

[T]

- [TAM09] Z. Á. Tamus, R. Cselkó et I. Berta, « Application of Partial Discharge Measurement on Laboratory Aged Low Voltage Cables », *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, QC, Canada, 2009.
- [TAN78] T. Tanaka et T. Okamoto, « A Mini Computer Based Partial Discharge Measurement system », *Proc. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, pp. 86 - 89, 1978.
- [TAN80] T. Tanaka et T. Okamoto, « Analysis of q-n and ϕ -n Characteristic of Partial Discharge in several electrodes systems », *Proc. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, pp. 190 - 193, 1980.
- [TAN86] T. Tanaka, « Internal partial discharge and material degradation », *IEEE Trans.*

Références bibliographiques

Elec. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 899 - 905, December 1986.

- [TAT85] T. Tatsuki et T. Tanaka, « Prediction of treeing from Pulse Height of Partial Discharges on Voltage Phase Angle », *Jap. Journal of Appl. Physics*, Vol 19, 1985.
- [TOK03] S. Tokunaga, T. Tsurusaki, Y. Z. Arief, S. Ohtsuka, T. Mizuno and M. Hikita, « Partial Discharge Characteristics till Breakdown «for XLPE Cable Joint with an Artificial Defect », *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, June 1-5 2003.
- [TRW01] TRW-A4 n°422881. THSA A330/A3340- Maximum performance calculation, 2002. Document interne Goodrich.

[W]

- [WET89] J. M. Wetzer et P.C.T. Van der Laan, « Prebreakdown Currents », *IEEE, Trans. Electr. Insul.*, Vol. 24, n° 2, pp. 297 - 308, 1989.
- [WOL 82] K.D. Wolter, J. Tanaka and J.F. Johnson, « A Study of the Gaseous Degradation Products of Corona-exposed Polyethylene », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 17, pp. 248 - 252, 1982.
- [WOL78] K.D. Wolter, J.F. Johnson and J. Tanaka, « Degradation product analysis for polymeric dielectric materials exposed to partial discharges », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 13, pp. 327 - 336, 1978.

[Y]

- [YON03] C. Yonghong, C. Xiaolin, R. Mingzhe, et Y. Bo, « Study on the Partial Discharge Characteristics of the XLPE Insulation Samples during Electrical Treeing Ageing », *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2003 Nagoya.

[Z]

- [ZAN09] Z. Fang, J. Lin, X. Xie, Y. Qiu, E. Kuffel, « Experimental study on the transition of the discharge modes in air dielectric barrier discharge », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol.42, pp. 1-7, 2009.
- [ZHA02] G. J. Zhang, W. B. Zhao, « Analyze of insulator surface charging due to charge injection and secondary electron emission in vacuum », *IEEE, International Symposium on Discharge and electrical Insulation in Vacuum*, pp. 622 - 625, 2002.

Références bibliographiques

- [ZHA06] G. J. Zhang, W. B. Zhao, « Analyze of insulator surface charging due to charge injection and secondary electron emission in vacuum », *IEEE International Symposium on Discharge and electrical Insulation in Vacuum*, pp. 622 - 625, 2002.